На правах рукописи

МОТОВИЛОВ Юрий Георгиевич

СИСТЕМА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И ПРОГНОЗОВ

Специальность 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Институте водных проблем РАН

Официальные оппоненты:

Румянцев Владислав Александрович

академик РАН, доктор географических наук, профессор, научный руководитель ФГБУН Институт озероведения Российской академии наук

Бураков Дмитрий Анатольевич

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой природообустройства Института землеустройства, кадастров и природообустройства ФГБОУ ВО Красноярский государственный аграрный университет

Лепихин Анатолий Павлович

доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем гидрологии суши Горного института филиала Пермского федерального научного центра Уральского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Защита состоится «____»_____2019 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д002.040.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт водных проблем Российской академии наук по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Тел.: 8 (499)135-54-15; e-mail: sokolovskiy@iwp.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных проблем РАН и на сайте: http://www.iwp.ru, с авторефератом – в сети Интернет на сайтах ВАК РФ (http://vak.ed.gov.ru/) и ИВП РАН (http://www.iwp.ru).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета; e-mail: sokolovskiy@iwp.ru, hydrowpi@iwp.ru.

Автореферат разослан _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук **М.А. Соколовский**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Разработка физико-математической модели гидрологического цикла речного бассейна – фундаментальная проблема гидрологии суши. За последние десятилетия достигнуты значительные успехи в ее решении, что связано с углублением представлений об описываемых процессах, модернизацией технологий измерений (в том числе, дистанционных), хранения и обработки исходных данных и методов их усвоения моделями, совершенствованием глобальных баз данных, развитием численных методов математического моделирования, вычислительных ресурсов и т.п. В гидрологии суши обозначилась тенденция к построению методической базы решения исследовательских и прикладных задач на базовых физико-математических принципах и понятиях, единых для геофизических наук. Вместе с тем существенная нелинейность гидрологических процессов на разных масштабах, изменчивость параметров речного бассейна и их сложная пространственная организация, чувствительность гидрологических систем к антропогенным воздействиям, взаимная эволюция характеристик бассейна под воздействием климатических и биотических факторов, наконец, недостаточность данных натурных наблюдений – по этим и другим причинам разработка адекватной физико-математической модели гидрологической системы речного бассейна относится к «одной из наиболее трудных задач геофизики» (Кучмент, 2008), которая все еще далека от своего решения.

Перспективное направление решения этой проблемы, оказавшееся особенно востребованным при построении физико-математических моделей крупных речных бассейнов, – использование концепции агрегирования процессов и параметров модели на характерных для описываемого речного бассейна пространственных масштабах (репрезентативных элементарных площадях), определяемых его физико-географическими факторами. В рамках указанной концепции элементарный водосбор (или водосбор малой реки) может являться расчетной единицей для моделирования крупного речного бассейна, состоящего из множества таких элементарных водосборов. В этом случае для описания гидрологических процессов уже не требуется такая пространственная детализация, как в традиционных физико-математических моделях – в агрегированных моделях оперируют осредненными в пределах элементарных водосборов потоками. Для описания гидрологических процессов здесь могут быть использованы упрощенные модели, полученные при тех или иных допущениях из базисных уравнений детальных физико-математических моделей. Такого рода модели сохраняют основные черты и преимущества традиционных пространственно-распределенных физико-математических моделей и в то же время они более эффективны при решении прикладных и исследовательских задач на более

крупных речных бассейнах, так как они менее требовательны к составу и полноте исходной информации, что делает их использование предпочтительным при недостаточности данных наблюдений. Подобные гидрологические модели все чаще начинают использоваться в задачах планирования и управления водными ресурсами крупных речных бассейнов, в особенности, когда необходимо учесть пространственную изменчивость стокообразования, обусловленную распределением по территории климатических факторов и характеристик подстилающей поверхности. Такие агрегированные крупномасштабные гидрологические модели, совместимые с масштабом расчетной ячейки моделей общей циркуляции атмосферы (порядка 10^4 км^2 и более), могут обмениваться информацией с атмосферными моделями для исследования водных ресурсов крупнейших речных систем при климатических и антропогенных изменениях речных бассейнов.

Задача крупномасштабных агрегированных моделей заключается в описании процессов гидрологического цикла для всей территории речных бассейнов, в том числе для не охваченных наблюдениями районов, с единым региональным набором параметров, определяемых на основе мониторинговых данных и физико-географического анализа факторов стокоформирования с использованием эмпирических зависимостей для рассматриваемого региона. Такие модели называют региональными гидрологическими моделями. В силу географической зональности можно ожидать, что значения таких параметров будут следовать зональности по физико-географическим факторам. Большое значение для проверки описания процессов в не охваченных гидрологическими наблюдениями районах представляют собой результаты обработки многолетних данных гидрометеорологического мониторинга речных бассейнов в виде различных карт составляющих гидрологического цикла для крупных территорий. Таким образом, преимущества региональных гидрологических моделей заключаются в: (1) применимости для крупнейших речных бассейнов мира или территорий с площадями порядка 10^4 км^2 и более; (2) применении моделей всюду в пределах этих областей для различных по масштабам водосборов (в том числе неизученных) с единым региональным набором параметров; (3) возможности калибровки и валидации моделей на пространственных полях характеристик гидрологического цикла речных бассейнов.

Диссертация посвящена развитию указанного направления в моделировании стока. С этой целью была разработана система физико-математических моделей процессов формирования речного стока, включающая модели разной степени детализации описания процессов и пространственного разрешения: от первых в мире детальных моделей с распределенными параметрами, описывающих гидротермический режим снежного покрова и мерзлой почвы на небольших водосборах, до интегральных моделей с

полураспределенными параметрами, описывающих динамику полей гидрологических переменных на крупнейших речных бассейнах Земного шара. Ключевой компонент системы – модель формирования стока ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics) – первая физико-математическая модель, ориентированная на описание гидрологических процессов в крупнейших речных бассейнах со смешанным дождевым и снеговым питанием рек. Для информационного обеспечения системы разработан Информационно-моделирующий комплекс (ИМК) (компьютерная технология с дружественным интерфейсом), созданный на базе этой модели и включающий помимо расчетного модуля средства информационной и технологической поддержки работы модели. На базе модели ECOMAG с помощью ИМК были построены региональные гидрологические модели для крупнейших речных бассейнов мира, расположенных в различных физико-географических зонах с различными условиями питания и типами гидрологического режима водных объектов. Показаны возможности воспроизведения с помощью моделей гидрографов речного стока в заданных точках речной сети и динамики полей характеристик гидрологического цикла (снежного покрова, влажности почвы, испарения, речного стока). Указанные возможности позволяют использовать модель ECOMAG как современный инструмент решения исследовательских задач гидрологии речных бассейнов, связанных с анализом условий формирования стока в различных частях водосборов, в том числе критических ситуаций, приводящих к формированию наводнений, получить представление о возможных изменениях условий формирования стока при антропогенных воздействиях на водосбор и возможных изменениях климата. В диссертации показаны возможности применения разработанной модели ECOMAG и соответствующего информационно-моделирующего комплекса для решения перечисленных проблем гидрологии суши в области исследования формирования стока на примере крупнейших речных бассейнов северного полушария, а также актуальных для нашей страны водохозяйственных задач управления водноресурсными системами, гидрологических расчетов и прогнозов. Описанную в диссертации модель ECOMAG можно рассматривать как пример эволюции физико-математических моделей в направлении решения перечисленных научных и прикладных проблем, расширения области применения моделей для бассейнов площадью от сотен до миллионов км^2.

Цели диссертационной работы:

1. Разработка детальных физико-математических моделей с распределенными параметрами для описания гидротермического режима снега и мерзлой почвы в моделях формирования весеннего половодья.
2. Разработка (на основе методов агрегирования уравнений и параметров детальных физико-математических моделей) модели формирования стока ECOMAG как

инструмента для построения региональных гидрологических моделей для крупных речных бассейнов со смешанным дождевым и снеговым питанием рек.

3. Разработка новых методов и технологий совершенствования традиционных методов гидрологических расчетов и прогнозов характеристик стока с использованием модели формирования стока ECOMAG, включая:

- совершенствование методов регулирования стока крупнейшими каскадами водохранилищ России,
- разработку методов оценки противопаводковой роли существующих и проектируемых водохранилищ,
- разработку методов ансамблевых долгосрочных прогнозов притока воды к водохранилищам,
- модернизацию методов краткосрочных прогнозов притока воды к водохранилищам.

Для достижения поставленных целей решались следующие **задачи**:

1. Разработка алгоритмов и методов численной реализации уравнений тепло- и влагопереноса в мерзлой почве и снеге, методов расчета гидро- и теплофизических характеристик талых и мерзлых почв и снежного покрова, алгоритмов учета подсеточных эффектов факторов стокообразования в моделях формирования талого стока.
2. Разработка методов агрегирования уравнений и параметров детальных физико-математических моделей для применения последних в задачах описания формирования речного стока на крупных водосборах.
3. Разработка информационно-моделирующего комплекса ECOMAG, обеспечивающего функционирование расчетного модуля модели средствами информационной и технологической поддержки.
4. Разработка методов задания и калибровки полей модельных параметров и методических приемов для смягчения эффекта эквифинальности и повышения идентифицируемости значений параметров региональных гидрологических моделей.
5. Исследование физических механизмов и пространственно-временной анализ условий формирования стока в крупных речных бассейнах на основе моделирования динамики полей характеристик гидрологического цикла суши (снежного покрова, влажности почвы, испарения, речного стока), в том числе в не охваченных наблюдениями районах.

Научная новизна

1. Впервые разработаны физико-математические модели с распределенными параметрами, описывающие процессы вертикального тепло- и влагопереноса в снежном покрове при его формировании и таянии, в мерзлой почве при инфильтрации в нее талых

вод. Предложены алгоритмы и методы численной реализации уравнений тепло- и влагопереноса в мерзлой почве и снеге, новые формулы для расчета гидро- и теплофизических характеристик талых и мерзлых почв и снежного покрова, методы расчета фазового состава почвенной влаги при отрицательных температурах. С использованием разработанных моделей гидротермического режима снега и мерзлой почвы впервые реализована детальная физико-математическая модель формирования стока весеннего половодья на примере водосбора р. Сосны, расположенного в центральной части лесостепной зоны ЕТР. Предложены алгоритмы учета подсеточных эффектов пространственных распределений факторов формирования талого стока. Проведены испытания модели и выполнены оценки влияния возможных антропогенных и климатических изменений на характеристики талого стока и водную эрозию.

2. Разработана первая физико-математическая модель формирования стока ECOMAG с описанием основных стокообразующих процессов на водосборах со смешанным дождевым и снеговым питанием рек, предназначенная для построения региональных гидрологических моделей в крупных речных бассейнах с использованием данных стандартного гидрометеорологического и водохозяйственного мониторинга. Модель базируется на представлении речного бассейна в виде мозаики из элементарных водосборов, соединенных отрезками русловой сети. Процессы гидрологического цикла на элементарном водосборе описаны путем интегрирования уравнений детальных физико-математических моделей, на основе которых построены: однослойная модель снежного покрова, модель термического режима в снеге, мерзлой и талой почве, модель процессов влагопереноса в почве, модель склонового стекания и движения воды по русловой сети. При построении модели ECOMAG разработаны следующие новые методы и алгоритмы:

а) методы численной реализации моделей частных процессов гидрологического цикла, которые являются значительно более простыми по сравнению с реализацией аналогичных детальных физико-математических моделей;

б) алгоритмы генерализации описания процессов и параметров влагообмена при изменении пространственных масштабов моделирования и увеличении площади расчетной ячейки от микро- к макромасштабу с использованием статистических распределений и различных процедур пространственного осреднения параметров подстилающей поверхности в зависимости от алгоритмов для расчета конкретных гидрологических процессов;

в) методы оценки, задания и калибровки полей модельных параметров, включая процедуры поэтапной калибровки и уменьшения размерности пространства поиска путем

включения дополнительной информации в виде ограничений на соотношения значений параметров;

г) критерии для оценки соответствия фактических и рассчитанных полей характеристик гидрологического цикла при калибровке параметров и валидации модели.

3. На основе модели ECOMAG с использованием Информационно-моделирующего комплекса разработаны региональные гидрологические модели для крупнейших речных бассейнов северного полушария (Волги, Лены, Амура и Маккензи), которые позволяют рассчитывать динамику полей гидрологических переменных (речного стока, характеристик снежного покрова, влажности почвы и др.) в различных физико-географических зонах с различными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов.

4. Разработаны новые методы и информационные технологии модернизации традиционных методов гидрологических расчетов и прогнозов на примере актуальных для нашей страны водохозяйственных задач оценки опасности наводнений и противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ, управления водноресурсными системами с каскадами водохранилищ комплексного назначения, долгосрочного и краткосрочного прогнозирования притока воды к водохранилищам.

Практическая значимость

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается следующими примерами их успешного внедрения в отечественную водохозяйственную практику.

В области совершенствования методологии по экономически обоснованному и экологически безопасному управлению водными ресурсами речных бассейнов с каскадами водохранилищ комплексного назначения разработана компьютерная технология, включающая модель ECOMAG, которая в комплексе с моделью функционирования водохозяйственных систем VOLPOW (разработчик С.Е. Беднарук) используется в целях информационного обеспечения поддержки принятия оптимальных управленческих решений по регулированию режимов работы каскадов водохранилищ в оперативной практике Федерального агентства водных ресурсов.

На основе ИМК ECOMAG по заданию ОАО РусГидро разработана компьютерная технология гидроинформационной поддержки для решения одной из актуальных задач управления риском наводнений – оценки противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ при разных сценариях развития паводковой опасности.

Технология долгосрочных прогнозов притока воды к водохранилищам была разработана для задач оптимизационных расчетов работы гидроузлов в увязке с развитием

гидрологической обстановки с заблаговременностью до 3 месяцев на среднесрочном уровне планирования водно-энергетических режимов (по заданию Росводресурсов и ОАО РусГидро).

В области краткосрочных гидрологических прогнозов на базе модели ECOMAG разработаны методики и технологии краткосрочного прогноза притока воды в водохранилища с заблаговременностью до семи суток с использованием прогнозных метеорологических данных (что особенно важно в условиях сокращения плотности гидрологической сети). Технологии предназначены для повышения точности определения притока воды в водохранилища на краткосрочном уровне планирования водно-энергетических режимов работы гидроузлов (по заданию ОАО РусГидро). Методики построены с учетом оперативной корректировки прогностических расчетов на основе усвоения вновь поступающей гидрометеорологической и водохозяйственной информации.

Защищаемые положения

1. Детальные физико-математические модели гидротермического режима снега и мерзлой почвы – эффективные инструменты решения научных задач и получения новых знаний в области исследования и моделирования процессов формирования весеннего половодья. Алгоритмы и методы численной реализации уравнений тепло- и влагопереноса в мерзлой почве и снеге. Методы расчета гидрофизических характеристик талых и мерзлых почв, фазового состава почвенной влаги при отрицательных температурах.

2. Для крупнейших речных бассейнов России построена и доведена до технологического уровня физико-математическая модель, которая позволяет воспроизводить и прогнозировать динамику полей гидрологических переменных (речного стока, характеристик снежного покрова, влажности почвы и др.) с высоким пространственно-временным разрешением и с достаточной, по принятым критериям, точностью; модель, которая опирается при этом на данные стандартного отечественного гидрометеорологического мониторинга. Это положение приобретает особую значимость ввиду ограниченности возможностей применения для бассейнов России развитых зарубежных гидрологических моделей, поскольку последние в большинстве случаев разрабатывались для отличающихся от российских условий формирования речного стока и опирались на отличающуюся по составу и точности исходную информацию.

3. Разработанные методы калибровки и проверки модели, в том числе привлечение пространственно распределенных данных о гидрологических переменных, позволяют существенно смягчить проблемы перекалибровки и эквифинальности, ранее считавшиеся сущностными недостатками физико-математических моделей.

4. Модернизированные методы гидрологических расчетов и прогнозов, базирующиеся на использовании разработанной физико-математической модели ECOMAG, позволяют повысить точность и расширить информационное содержание расчетов и прогнозов по сравнению с существующими оперативными методиками. Модель ECOMAG может служить единой методической основой гидрологических расчетов и прогнозов – методов, традиционно опирающихся на существенно различные методические подходы.

Апробация работы

Результаты исследований по теме диссертации докладывались на международных, всероссийских и всесоюзных конференциях, среди которых: Ассамблеи Европейского геофизического союза (Вена, Австрия, 2018-2014, 2006, 2005); Ассамблеи Европейского геофизического общества (Ницца, Франция, 2001, 1998, Вена, Австрия, 1997); Ассамблея Международной ассоциации гидрологических наук (Гетеборг, Швеция, 2016); Ассамблея международного геодезического и геофизического союза (Прага, Чехия, 2015); VII и VI Всероссийские гидрологические съезды, (Санкт-Петербург, 2013, 2004); V Всесоюзный гидрологический съезд (Ленинград, 1986); Тринадцатая Сессия Северо-Евразийского Климатического форума по сезонным прогнозам "NEACOF-13" (Москва, 2017); Всероссийская научная конференция с международным участием "Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения", Сочи, 2017; Международная научно-практическая конференция "BRICS Water Forum" (Москва, 2016); Всероссийская научная конференция "Научное обеспечение реализации "Водной стратегии РФ на период до 2020 г." (Петрозаводск, 2015); Международная научно-практическая конференция "Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей" (Москва, 2014); MAIRS Open Science Conference "Future Earth in Asia" (Пекин, КНР, 2014); 3-я Всероссийская конференция с международным участием "Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов" (Барнаул, 2010); Международная конференция "Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях" (Москва, 2008); Британско-Российская конференция "Гидрологические последствия изменений климата" (Барнаул, 2007); Международная конференция "Будущее моделей с распределенными параметрами" (Cemagref, Лион, Франция, 2004); Международный семинар НАТО "Физико-математические модели формирования речного стока и их применение при недостаточности гидрологических наблюдений в речных бассейнах" (Москва, 2004); Всемирная конференция по климату (Москва, 2003); Всероссийский конгресс работников водного хозяйства (Москва, 2003); Международная конференция "Global Energy and Water Cycle" (Пекин, КНР, 1999); 3-я Международная конференция по GEWEX в Азии и GAME (Республика Корея, 1997); Всероссийская научно-практическая конференция "Экологический мониторинг: проблемы создания и развития ЕГСЭМ" (Москва, 1996);

Международная гидрологическая конференция северных стран (Рованиеми, Финляндия, 1988); Международный семинар по речным системам (Хельсинки, Финляндия, 1986) и др.

Под научным руководством автора были защищены 4 кандидатские диссертации аспирантов, при его активной консультационной поддержке подготовлены и защищены еще 4 диссертации (включая две PhD в Норвегии и Швеции), исследования в которых были связаны с развитием положений и приложений физико-математической модели формирования стока ECOMAG.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в двух монографиях и 82 статьях, в том числе в 51 статьях в рецензируемых изданиях. Расчеты выполнены с использованием 4 разработанных автором сертифицированных программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Объем работы составляет 333 страницы, включая 78 рисунков и 22 таблицы. Библиографический список содержит 249 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит постановку задачи, основные цели исследования, обоснование актуальности решаемых задач и научную новизну предлагаемых методов решения.

Глава 1. Развитие исследований по построению физико-математических моделей формирования стока в речных бассейнах

Интенсивное развитие методов математического моделирования в гидрологии речных бассейнов имеет более чем полувековую историю. Существенный прорыв в области создания моделей, описывающих основные процессы гидрологического цикла речного бассейна и их взаимодействие при формировании речного стока, произошел в течение 1960-х годов. Фундаментальные монографии “Динамическая гидрология” П. Иглсона (Eagleson, 1970) и “Математическое моделирование речного стока” Л.С. Кучмента (1971) подвели итог достижениям 1950–1960-х годов в области математического моделирования гидрологических процессов и во многом определили направления развития на ближайшие десятилетия.

Первые физико-математические модели с распределенными параметрами, описывающие основные процессы формирования речного стока, и результаты их апробации по данным наблюдений на речных водосборах были опубликованы в серии статей 1986 года. Это Европейская Гидрологическая Система (SHE), созданная консорциумом 3 европейских исследовательских институтов (Abbott et al., 1986), и Система моделей Института водных проблем РАН (Кучмент и др., 1986; Kuchment et al., 1986). В разработанной сотрудниками

лаборатории гидрологического цикла суши ИВП РАН под руководством Л.С. Кучмента системе физико-математических моделей формирования стока с распределенными параметрами значительное место уделено описанию процессов, происходящих в зимне-весенний период. Весеннее половодье в условиях нашей страны является важнейшим гидрологическим процессом, определяющим максимальные расходы на большинстве равнинных рек и основные гидрологические характеристики, используемые при регулировании стока.

Первая детальная физико-математическая модель формирования стока весеннего половодья была разработана в ИВП РАН в период с конца 1970-х и до начала 1990-х годов. Описание отдельных блоков этой модели и ее приложений представлены в многочисленных статьях автора, в том числе с соавторами, и в значительной степени обобщены в совместных монографиях (Кучмент, Демидов, Мотовилов, 1983; Кучмент, Мотовилов, Назаров, 1990).

В первом разделе главы приведены основные уравнения, описывающие процессы формирования талого стока на речном водосборе, кратко охарактеризованы методы задания гидро- и теплофизических характеристик почвогрунтов и снежного покрова, методы численной реализации уравнений тепло- и влагопереноса в системе снег–почва, результаты сопоставления численных экспериментов с данными лабораторных и полевых исследований, дана характеристика разработанной физико-математической модели формирования стока весеннего половодья, реализованной на примере водосбора р. Сосны, расположенного в центральной части лесостепной зоны ЕТР.

Во втором разделе главы рассмотрены основные положения дискуссии, разгоревшейся в гидрологическом сообществе на рубеже 90-х годов во многом благодаря ярким полемическим талантам крупного английского гидролога К. Бевена (Beven, 1989), который сам в 80-х годах являлся одним из активных разработчиков широко известной физико-математической модели IHDM, и являвшегося ведущим представителем российской школы математического моделирования в гидрологии Ю.Б.Виноградова (1988), связанной с проблемами физико-математического моделирования речных бассейнов. Основная суть претензий к физико-математическим моделям сводилась к тезису, что уравнения математической физики неадекватно описывают ряд гидрологических процессов и применяются на реальных водосборах для несвойственных пространственных масштабов, где параметры моделей не могут быть измерены и их необходимо калибровать подобно тому, как это делается в концептуальных моделях стока.

Активная дискуссия сторонников и критиков традиционного физико-математического направления в моделировании формирования стока не имела целью принизить научный потенциал таких моделей, достижения в этой области признаются подавляющим

большинством ведущих гидрологов. Цель дискуссии заключалась в поиске путей разрешения проблемы масштабирования в моделировании гидрологических процессов при переходе от точки к склону и далее к элементарному водосбору и речному бассейну и, в конечном итоге, в усовершенствовании текущей генерации физико-математических моделей формирования стока.

Сейчас, по прошествии более 20 лет, когда достигнуты значительные успехи по совершенствованию физико-математических моделей и расширению области их применимости, некоторые положения критики утратили свою остроту. Ведущие российские гидрологи Л.С. Кучмент (2008) и А.Н. Гельфан (2007) резервы для усовершенствования физико-математических моделей связывают с уточнением описания отдельных гидрологических процессов, включением в модели новых механизмов и учетом стохастических закономерностей пространственного изменения характеристик водосбора. По мнению многих ученых проблема масштаба считается фундаментальной и главной нерешенной задачей современного гидрологического моделирования.

При гидрологическом моделировании больших территорий и крупных речных систем конструктивной оказалась идея использования и более крупных расчетных ячеек порядка десятков, сотен или даже тысяч квадратных километров. При этом необходимо дополнительное теоретическое обоснование проблемы масштабирования в гидрологических моделях. Проблема заключается в нахождении новых (по сравнению с точкой) расчетных единиц определенного масштаба, генерализации (фильтрации) микромасштабных флуктуаций характеристик, имеющих второстепенное значение на данном уровне рассмотрения, параметризации моделей гидрологических процессов на мезо- или макромасштабном уровне и нахождении эффективных параметров моделей.

Определенными вехами на пути разрешения проблемы масштаба являются выдвинутая Е. Вудом с соавторами (Wood et al., 1988, 1990) концепция репрезентативной элементарной области (representative elementary area REA) и предложенное П. Реджиани с соавторами (Reggiani, Schellekens, 2003) понятие репрезентативного элементарного водосбора (representative elementary watershed REW). Не вдаваясь в детали, смысл этих концепций заключается в нахождении новых (по сравнению с точкой) ландшафтно-однородных расчетных единиц определенного масштаба (REA или REW) и генерализации параметров гидрологических моделей для этого масштаба. В рамках предложенных концепций территория крупного речного бассейна представляется мозаикой из элементарных водосборов, для описания гидрологических процессов на которых используются упрощенные модели в обыкновенных дифференциальных уравнениях, бóльшая часть которых получена либо интегрированием базисных уравнений детальных

физико-математических моделей по пространству, либо путем отбрасывания второстепенных членов этих уравнений, имеющих малый вклад в сущности протекающих гидрологических процессов на водосборе, либо привлечением принципиально иных упрощенных схем описания процессов, разумных в принятых пространственно-временных масштабах и нередко используемых в концептуальных моделях.

Таким образом, ключевая концепция при построении модели формирования стока для больших речных бассейнов заключается в нахождении новых укрупненных расчетных единиц масштаба REA или REW, либо еще более крупных расчетных областей. Полагают, что горизонтальные перетоки воды через границы подводосборов отсутствуют, а трансформация стока, образующегося на каждой из выделенных единиц, осуществляется через речную сеть. В масштабе всего бассейна пространственные неоднородности стокоформирования учитываются путем задания для подводосборов различных метеорологических воздействий и характеристик подстилающей поверхности.

В третьем разделе главы рассматриваются упрощенные подходы к описанию основных процессов формирования стока и их модели на основе пространственного интегрирования уравнений детальных физико-математической моделей.

Глава 2. Физико-математическая модель ECOMAG: базовые уравнения, процедуры калибровки и проверки, информационное обеспечение

Глава посвящена описанию структуры, уравнений, алгоритмов и информационного обеспечения разработанной физико-математической модели ECOMAG. В модели учитываются основные процессы гидрологического цикла суши в бассейнах рек со смешанным дождевым и снеговым питанием: формирование снежного покрова и снеготаяние, инфильтрация воды в почву и испарение, термический и водный режим почвы с учетом процессов ее промерзания и оттаивания, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и речного стока. При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется нерегулярной (Рисунок 1) сеткой на отдельные расчетные элементы с учетом особенностей рельефа и структуры речной сети. Моделирование гидрологических процессов на каждом расчетном элементе выполняется для четырех уровней: для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт Б), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова.

Ниже приведены основные уравнения и алгоритмы модели ECOMAG для расчетного элемента речного бассейна.

Поверхностный склоновый сток (индекс 0)

$$\frac{1}{2}\frac{dh_0}{dt} = R - V_0 + V_{f,1} - Q_0 / F, \qquad V_0 = K_1\left[1 - \exp(-R/K_1)\right], \qquad Q_0 = bi^{1/2}h_0^{5/3}/n.$$

Почвенные горизонты А (i=1) и Б (i=2)

Капиллярная зона (индекс c):

$$Z_i\frac{dW_i}{dt} = V_{c,i} - E_i, \quad V_{c,i} = V_{i-1}[1 - (W_i/FCM_i)^{\beta}],$$

$$E_i = \begin{cases} k_{s,i}k_e d & for\ W_i > W_{e,i}, \\ k_{s,i}k_e d(W_i - W_{e,i}) & for\ W_i \le W_{e,i}, \end{cases}$$

Некапиллярная зона (индекс nc):

$$\frac{D_i}{2}\frac{dh_i}{dt} = (V_{nc,i} + V_{f,i+1} - V_{f,i} - V_i) - Q_i / F,$$

$$V_{nc,i} = V_{i-1} - V_{c,i}, \qquad V_i = \begin{cases} K_{i+1} & for\ h_i > 0, \\ 0 & for\ h_i = 0, \end{cases}$$

$$Q_i = bK_{x,i}ih_i.$$

Зона грунтовых вод (индекс 3)

$$D_3\frac{dh_3}{dt} = (V_2 - V_g - V_{f,3} - E_3) - Q_3 / F, \qquad E_3 = k_{s,3}k_e d, \qquad Q_3 = bK_{x,3}ih_3.$$

Речной сток (индекс *r*)

$$\frac{1}{2}\frac{dh_r}{dt} = (Q_{lat} + Q_{r,1} - Q_{r,2}) / F_r, \qquad Q_{lat} = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3, \qquad Q_r = i_r^{1/2}h_r^{5/3}b_r/n_r.$$

Зимний сезон

Фомирование снежного покрова и снеготаяние (индекс 4)

$$\frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{d}{dt}(I_4 h_4) = R_s - E_s - S_T + S_f, \qquad \frac{dh_4}{dt} = \rho_w\left[\frac{R_s}{\rho_n} - \frac{S_T + E_s}{\rho_i I}\right] - v(h_4, I_4, W_4),$$

$$\frac{d}{dt}(W_4 h_4) = R_w + S_T - E_W - V_4 - S_f, \qquad V_4 = \begin{cases} (W_4 - WHC)h_4 / \delta t & for\ W_4 > WHC, \\ 0 & for\ W_4 \le WHC. \end{cases}$$

Термический режим снега и почвы

$$Q_f\frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda_T T_g}{H_g - H_f}, \quad H_T = \left(H_f^2 + \frac{2\lambda_T T}{Q_f}\delta t\right)^{0,5}, \quad T_0 = \frac{\lambda_S T H_f}{\lambda_S H_f + \lambda_f h_4}, \quad Q_f = \rho_w L_f(W_1 - W_u).$$

Инфильтрация в мерзлую почву (индекс *f*)

$$V_f = K_{1,f}\left[1 - exp\left(V_4 / K_{1,f}\right)\right], \quad K_{1,f} = K_1\left(\frac{P_1 - \bar{I} - WP_1}{P_1 - WP_1}\right)^4 / (1 + k_i\bar{I})^2, \quad \bar{I} = \frac{\rho_w}{\rho_i}\frac{H_f - H_T}{Z_1}(W_1 - W_u).$$

Обозначения и размерность

Обозначения	Описание	Единицы, модель	Единицы, СІ
	Общие		
t	время	сут	s
δt	расчетный шаг по времени	сут	s
b	ширина	см	m
L	длина	см	m
F	площадь	см^2	m^2
Z	толщина слоя	см	m
i	уклон	см см$^{-1}$	m m^{-1}
	Метеорологические характеристики		
d	дефицит влажности воздуха	мб	Pa
R	осадки	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
T	температура воздуха	°C	°K
	Гидрофизические константы		

ρ_i	плотность льда	г см$^{-3}$	kg m^{-3}
ρ_w	плотность воды	г см$^{-3}$	kg m^{-3}
L_f	скрытая теплота плавления льда	кал г$^{-1}$	J kg^{-1}
	Основные гидрологические переменные		
h	глубина слоя воды	см	m
h_V	слой впитавшейся влаги за время δt	см	m
Q	горизонтальный поток воды (расход)	см^3 сут$^{-1}$	m^3 s^{-1}
V	вертикальный поток	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
V_c	интенсивность просачивания влаги в капиллярную зону почв	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
V_{nc}	интенсивность просачивания влаги в некапиллярную зону почв	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
V_f	интенсивность возвратного потока из нижележащих горизонтов	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
V_g	интенсивность глубинного водообмена грунтовых вод	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
W	объемное содержание влаги	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
I	объемное содержание льда	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
E	интенсивность эвапотранспирации	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
	Почвенные константы		
ρ	объемная плотность	г см$^{-3}$	kg m^{-3}
P	пористость	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
FC	полевая влагоемкость	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
WP	влажность завядания	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
	Почвенные характеристики		
K	вертикальный коэффициент фильтрации	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
K_x	горизонтальный коэффициент фильтрации	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
D	$=P-FC$, некапиллярная пористость	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
W_e	$=(FC-WP)/2$, критическая влажность для эвапотранспирации	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
FCM	максимальное значение FC	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
k_e	параметр потенциальной эвапотранспирации	см сут$^{-1}$мб$^{-1}$	m s^{-1} Pa^{-1}
k_s, k_g	параметры распределения корней между слоями	б/р	dl
β	параметр распределения пор	б/р	dl
	Снежный покров		
R_r	интенсивность осадков в виде дождя	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
R_s	интенсивность осадков в виде снега	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
S_T	интенсивность снеготаяния	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
S_f	интенсивность замерзания талой воды в снеге	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
T_0	температура поверхности раздела снег–почва	°C	°K
WHC	водоудерживающая способность снега	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
v	скорость уплотнения снега	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
ρ_n	плотность свежевыпавшего снега	г см$^{-3}$	kg m^{-3}
	Характеристики мерзлой почвы		
K_f	гидравлическая проводимость при насыщении	см сут$^{-1}$	m s^{-1}
k_i	параметр мерзлой почвы	б/р	dl
H_f	глубина промерзания почвы	см	m
H_T	глубина оттаивания мерзлой почвы	см	m
H_g	глубина слоя с постоянной температурой T_g	см	m
W_u	объемное содержание незамерзшей влаги	см^3 см$^{-3}$	m^3 m^{-3}
λ_f, λ_T, λ_s	коэффициенты теплопроводности мерзлой, талой почвы и снега	кал (см сут °C)$^{-1}$	W (m °K)$^{-1}$
	Характеристики поверхности		
n	коэффициент шероховатости Маннинга	сут см$^{-0.33}$	s m$^{-0.33}$

Индексы

m	среднее значение переменной
0	характеристики поверхностной емкости
1	характеристики горизонта А почв
2	характеристики горизонта Б почв
3	характеристики зоны грунтовых вод
4	характеристики снежного покрова
r	характеристики речного стока
w	характеристики жидкой воды
i	характеристики льда

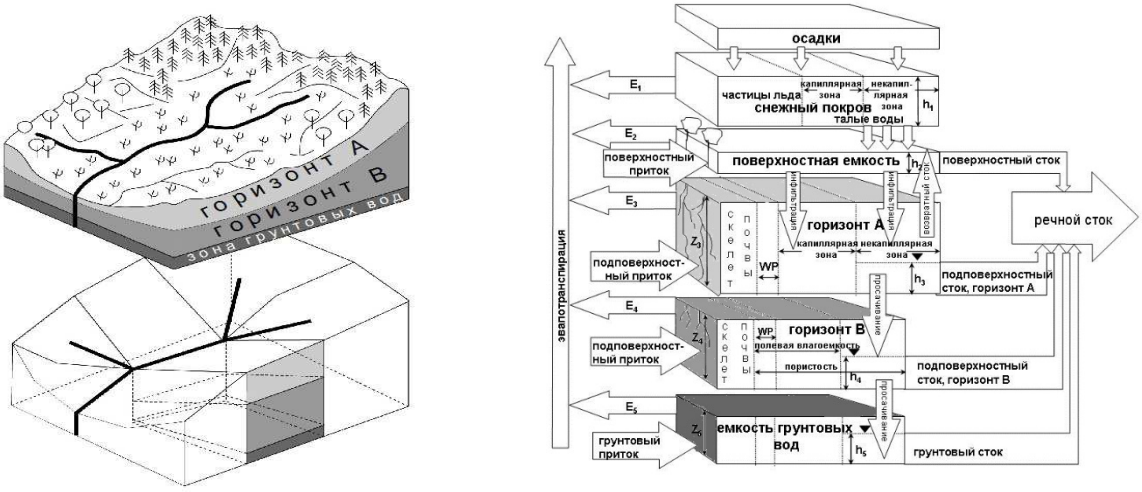


Рисунок 1 – Схематизация речного бассейна и вертикальная структура гидрологической модели для элементарной площадки

В связи с отсутствием устоявшихся методик калибровки полей модельных параметров пространственно-распределенных гидрологических моделей для смягчения эффекта эквифинальности и повышения идентифицируемости значений параметров модели ECOMAG разработаны методические приемы и реализована следующая схема оценки, задания и калибровки полей модельных параметров:

1. Задание большей части физически обоснованных параметров для крупных речных бассейнов производится на основе глобальных баз картографических данных региона (характеристики почв, растительности и ландшафтов).

2. Калибровка параметров выполняется не для пространственных единиц речного бассейна (например, частных или элементарных водосборов), а для типов характеристик подстилающей поверхности (почв, растительности, ландшафтов), слагающих эти элементарные водосборы. Своеобразие частных речных бассейнов отражается в модели сочетанием в них и пространственным распределением конкретных типов почв, растительности, рельефа, уклонов, структуры речной сети и метеорологических условий.

3. Калибровка и корректировка параметров моделей, ответственных за определенные процессы, проводятся по данным регионального мониторинга этих процессов (поэтапная калибровка).

4. Для сокращения количества калибруемых параметров калибровка выполняется не для абсолютных значений параметров характеристик подстилающей поверхности, а для множителей к абсолютным значениям так, чтобы сохранить изначально заданные соотношения между ними.

Для удобства проведения расчетов в рамках различных проектов информационной поддержки при управлении водными ресурсами, прогнозировании водного режима, а также для научных исследований разработана компьютерная технология Информационно-моделирующего комплекса ИМК ECOMAG. Комплекс включает в себя: расчетный модуль физико-математической модели ECOMAG и средства информационной и технологической поддержки работы этого модуля – тематические цифровые электронные карты, технологию автоматизированного разбиения водосборной площади на элементарные водосборы и схематизации речной сети, базы данных характеристик подстилающей поверхности, базы данных гидрометеорологической и водохозяйственной информации, средства управления базами данных и геоинформационной обработки пространственной информации и управляющую оболочку (Рисунок 2). Имеющиеся в ИМК информационные ресурсы по объему и пространственному покрытию территории России достаточны для построения региональных гидрологических моделей и проведения расчетов для любых крупных речных бассейнов России.

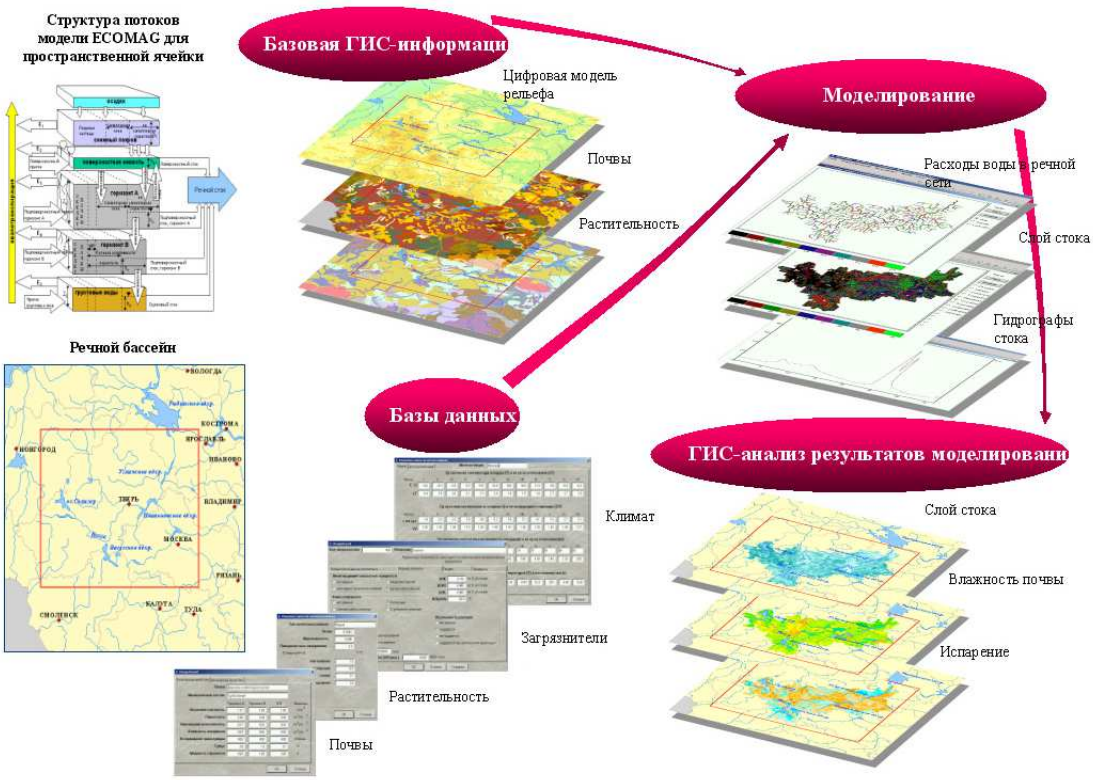


Рисунок 2 – Структура Информационно-моделирующего комплекса ECOMAG

Глава 3. Моделирование гидрологических процессов на малых речных бассейнах (по материалам международного эксперимента NOPEX)

Окончательная формулировка модели ECOMAG, отработка методологии задания и калибровки модельных параметров, первые испытания разработанных алгоритмов, а также

исследование возможностей модели по учету пространственных неоднородностей в процессах формирования стока на региональном уровне проводились на основе данных детальных полевых и экспериментальных исследований в рамках междисциплинарного международного эксперимента NOPEX (NOrthern hemisphere climate Processes land-surface EXperiment), одна из целей которого заключалась в построении и валидации гидрологических и метеорологических моделей в различных пространственно-временных масштабах.

Комплексные испытания региональной гидрологической модели ECOMAG проводились по следующим этапам:

- Уточнение (корректировка) почвенных параметров модели по данным наблюдений за динамикой влажности почвы и уровней грунтовых вод в экспериментальных бассейнах в периоды полевых кампаний NOPEX;
- Калибровка параметров и валидация модели по данным многолетних наблюдений за речным стоком в 3 речных бассейнах области NOPEX с единым, общим для всех водосборов, набором параметров;
- Проверка модели по данным многолетних наблюдений за речным стоком в 6 речных бассейнах области NOPEX, не использовавшихся для калибровки, с единым набором параметров;
- Проверка модели по данным синоптических наблюдений речного стока в периоды полевых кампаний NOPEX;
- Проверка модели по региональным оценкам составляющих водного баланса как отдельных речных бассейнов, так и для всей области NOPEX.

Исследовавшаяся в рамках проекта NOPEX территория расположена в южной Швеции к северу от города Упсала, имеет размеры 80×100 км и является типичной и репрезентативной для изучения пространственной изменчивости процессов энерго- и массообмена, а также гидрологических процессов на региональном уровне в бореальной зоне (Halldin et al., 1999; Thomas, Rowntree, 1992). Для всестороннего тестирования моделей во время двух интенсивных полевых циклов наблюдений (Concentrated Field Efforts, CFE) в 1994 г. и 1995 года было собрано (с участием автора) большое количество комплексных географических, гидрометеорологических и других данных, включающих параллельные измерения на трех уровнях: наземные наблюдения (измерения расходов воды, уровней грунтовых вод, влажности почвы, испарения), наблюдения на высотных мачтах и зондирование с самолетов (Samuelsson, Tjernstrom, 1999).

Возможность идентификации характерного масштаба репрезентативной элементарной области (REA), которая определяет минимальные размеры территории, содержащей существенные черты микромасштабной неоднородности ландшафтных характеристик, имела

определяющее значение для адаптации модели ECOMAG на полигоне NOPEX. Процедура выделения REA была основана на оценке пространственного масштаба, для которого стабилизируется дисперсия средних значений измеренных переменных при увеличении площади их осреднения. На основании анализа пространственных географических данных, многочисленных данных по влажности почвы, уровням грунтовых вод и расходам в речной системе был сделан вывод, что для данного типа местности основная часть пространственной изменчивости флуктуаций стокоформирующих характеристик содержится в ячейках REA с линейным размером 2 км. Полученный масштаб находится внутри диапазона оценок линейных размеров REA (1–10 км), выполненных для других речных бассейнов (Bloschl, Sivapalan, 1995; Gottschalk et al., 2001). В соответствии с результатами проведенного анализа при моделировании гидрологических процессов в области NOPEX вся исследуемая территория покрывалась расчетной сеткой с квадратными ячейками 2x2 км. На основе ЦМР на территории полигона NOPEX были выделены границы 9 речных бассейнов с площадями водосборов от 6.6 км^2 до 950 км^2. Каждой ячейке REA размером 2x2 км из соответствующих карт назначались типы почв и подстилающей поверхности.

Расчеты по модели ECOMAG проводятся по метеорологическим данным с суточным шагом по времени. Поля метеоданных (суточных осадков, среднесуточной температуры и дефицита влажности воздуха) на территорию полигона NOPEX являются входом в модель. Модель в непрерывном режиме рассчитывает поля снежного покрова, снеготаяния, увлажнения и промерзания почвы, испарения, генетических составляющих речного стока. Детальные пространственно-распределенные многоуровенные данные эксперимента NOPEX использовались для калибровки и всесторонней проверки модели. Определение единого (регионального) набора параметров модели ECOMAG для всей области NOPEX проводилось в соответствии с методикой поэтапной калибровки.

Результаты тестирования модели в соответствии с иерархической схемой испытаний моделей Клемеша (Klemes, 1986) показали, что:

- оценки точности калибровочной и проверочной серий расчетов стока для трех речных бассейнов, задействованных при калибровке параметров модели (*Split-sample test*), незначительно отличаются между собой;
- оценки точности расчетов стока для трех речных бассейнов, задействованных при калибровке параметров модели, и шести бассейнов, не задействованных для калибровки, для одного и того же периода расчета оказались близкими (*Proxi-basin test*);
- оценки точности расчетов стока для трех речных бассейнов, задействованных при калибровке параметров модели для одного периода расчета, и шести бассейнов, не

задействованных для калибровки, для другого периода расчета близки между собой (*Proxi-basin differential split-sample test*).

Таким образом, результаты испытаний по схеме Клемеша показали, что гидрологическая модель ECOMAG может быть использована для расчетов стока на региональном уровне на изученных и неизученных речных бассейнах в условиях меняющегося климата и при антропогенных изменениях речных бассейнов.

Качество расчетов речного стока по модели ECOMAG было оценено также путем сравнения с данными одномоментных измерений расходов воды в различных точках одной речной системы в бассейне реки Fyrisån (синоптические измерения стока) (Krasovskaia, 1988). В целом получено хорошее соответствие результатов, особенно если учесть, что синоптические данные по стоку не были задействованы в процессе калибровки параметров модели.

Наблюдения за динамикой влажности почвы и уровней грунтовых вод проводились в ряде небольших экспериментальных бассейнов с различными типами почв и ландшафтов. В экспериментальных бассейнах проводились одновременные измерения влажности почвы (от 25 до 150 точек одномоментных измерений в каждом из экспериментальных бассейнов) и уровней грунтовых вод (от 16 до 19 точек измерений). Одномоментные данные наблюдений, полученные в пределах каждого такого бассейна, были усреднены и приняты как характеристика влажности почвы или уровня грунтовых вод для пространственного расчетного элемента REA. Эти данные были использованы для корректировки (уточнения) почвенных параметров на стадии поэтапной калибровки модели. Получено удовлетворительное соответствие (по критерию *NSE*) осредненных по экспериментальным площадкам значений влажности почвы и уровней грунтовых вод с рассчитанными по модели значениями для ячеек REA.

Результаты численных экспериментов по моделированию полей характеристик гидрологического цикла для всей области NOPEX показали достаточно высокую изменчивость водно-балансовых компонентов (осадков, увлажнения почв, испарения, поверхностного стока) по территории. Модельные и фактические оценки составляющих водного баланса (испарения по наблюдениям на мачтах и результатам самолетного зондирования, запасов влаги в почве и подземных водах, речного стока) были сопоставлены как для всей области NOPEX, так и отдельных ее частей в пределах 9 водосборных площадей.

Таким образом, комплексные испытания модели ECOMAG по данным эксперимента NOPEX позволяют сделать вывод, что модель удовлетворяет, по крайней мере, двум пунктам принадлежности к региональным моделям (применимость для крупных территорий и

применение модели всюду в пределах рассматриваемой области, в том числе для неизученных водосборов, с единым региональным набором параметров). Третий признак принадлежности (возможность калибровки и валидации модели на пространственных полях характеристик гидрологического цикла) реализован лишь частично, т.к. даже в рамках такого детального эксперимента оказалось недостаточно данных для построения таких полей и проверка выполнена для составляющих водного баланса, интегрированных в пределах 9 водосборных площадей области NOPEX.

Глава 4. Моделирование формирования речного стока и полей гидрологических характеристик в крупнейших речных бассейнах

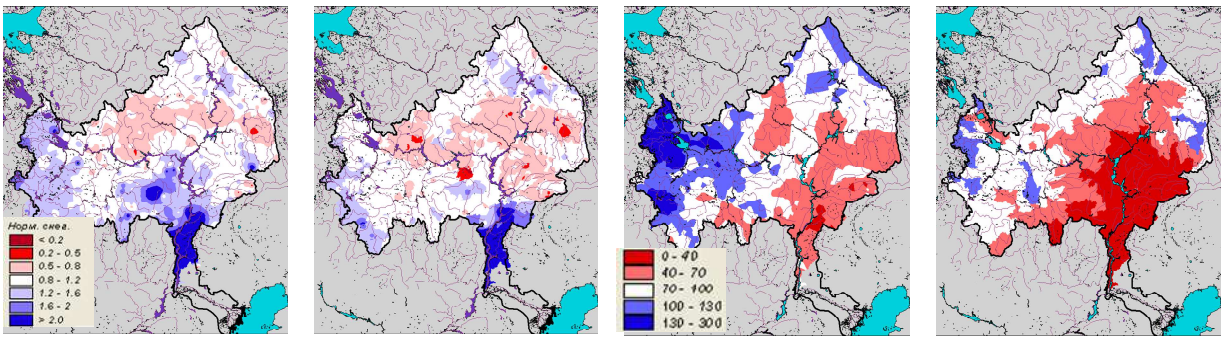
В главе рассмотрен опыт применения модели ECOMAG для построения региональных моделей и моделирования гидрографов и полей характеристик гидрологического цикла в ряде крупнейших речных бассейнов северного полушария: Волги, Лены, Амура и Маккензи.

Бассейн р. Волги

Бассейн Волги – крупнейшей реки Европы, имеет площадь 1360000 км², длина реки 3530 км. В бассейне сосредоточена наиболее густая сеть гидрометеорологического мониторинга среди других регионов России В состав гидрометеорологического и водохозяйственного обеспечения модели для проведения гидрологических расчетов в бассейне Волги были задействованы ежесуточные данные по 350 метеостанциям за период 1966–2016 гг., по притоку воды к водохранилищам Волжско-Камского каскада (ВКК), расходам воды на гидрометрических постах, а также ежедекадные данные по характеристикам снежного покрова на 370 пунктах маршрутных снегомерных наблюдений и данные по влажности почвы на 230 агрометеорологических станциях.

Испытания региональной модели в бассейне Волги проиллюстрированы на примере моделирования важнейших характеристик кругооборота тепла и влаги в атмосфере и на суше – динамики пространственных полей запасов воды в снежном покрове и влажности почвы. Фактические поля этих характеристик строились по данным снегомерных наблюдений и измерений продуктивной влаги на агрометеорологических станциях с помощью ГИС-технологии. В соответствии с процедурой поэтапной калибровки параметров калибровка параметров подмоделей снежного покрова и миграции почвенной влаги проводилась последовательно по данным регионального гидрометеорологического мониторинга снегозапасов и влажности почвы.

Визуальный анализ сравнения динамики фактических и рассчитанных полей снегозапасов и влажности почвы в различных частях бассейна Волги за многолетний период показал, что, как правило, поля отличаются не более чем на одну градацию легенды рисунков (Рисунок 3). Из анализа полей с помощью статистических критериев следует, что



а **б** **в** **г**

Рисунок 3 – Поля нормированных запасов воды в снежном покрове в бассейне Волги на 20 марта 2010 г. (а, б) и запасов продуктивной влаги в 50-см слое почвы на10 июня 2010 г. (в, г): фактические (а, в) и смоделированные (б, г)

предложенный подход к моделированию динамики пространственных полей характеристик гидрологического цикла речных бассейнов на больших территориях дает удовлетворительные результаты. Кроме того, хорошее соответствие временной динамики рассчитанных и фактических суммарных снегозапасов в бассейне Волги (NSE_4=0.93) и осредненной по бассейну влажности почвы (NSE_4=0.90) свидетельствует как о высоком качестве модели, так и о надежности определения этих интегральных характеристик в бассейне Волги по данным снегомерных съемок и агрометеорологических измерений. В диссертации проанализирована серия численных экспериментов по выявлению влияния размеров (масштабов) расчетных ячеек и предложенных алгоритмов генерализации и осреднения параметров модели на точность результатов расчетов. Установлено, что на равнинных территориях ЕТР максимальные размеры расчетных ячеек модели не должны превышать 13500 км^2.

На заключительном этапе моделирования формирования стока в речных бассейнах осуществляется расчет трансформации эффективного поступления воды в речную сеть по русловой системе. Основная проблема корректного расчета трансформации стока при изменении масштабов моделирования заключается в генерализации и фильтрации так называемой первопорядковой речной сети. Для приближенного учета трансформации склонового и руслового стока в «потерянной» первопорядковой речной сети был предложен алгоритм, базирующийся на приближенных аппроксимациях геоморфологического единичного гидрографа (Rodriguez-Iturbe, 1993) с использованием характерных значений Хортоновских масштабных коэффициентов для равнинных рек.

Учитывая важность и ответственность прикладных приложений информационного гидрологического обеспечения задач водохозяйственной и прогностической направленности, для повышения точности моделирования режима стока в различных частях водосбора Волги

помимо единой модели для всего бассейна, были построены отдельные модели формирования стока для частных водосборных площадей каждого из водохранилищ Волжско-Камского каскада. В качестве примеров в диссертации представлены результаты моделирования формирования стока (гидрографов стока в различных створах речной сети, полей стока) для водосборных площадей 3 водохранилищ ВКК (Чебоксарского, Камского и Нижнекамского).

Бассейн р. Лены

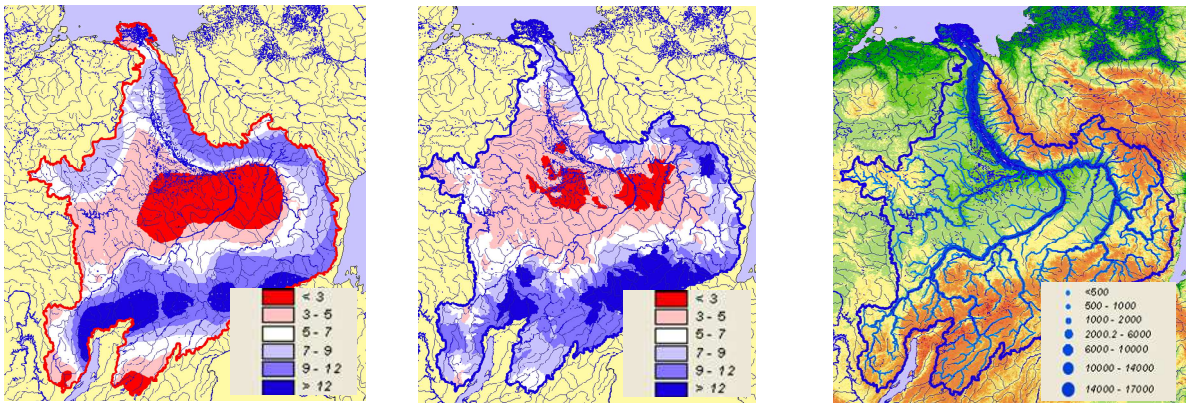
Лена является крупнейшей рекой Восточной Сибири, ее длина – 4260 км, площадь бассейна – 2490000 км^2. Практически вся территория бассейна расположена в области распространения мощных толщ многолетнемерзлых горных пород, которые вносят свою специфику в процессы стокообразования.

Процедура поэтапной калибровки параметров модели, показавшая эффективность для бассейна Волги, не применима для бассейна Лены, где мониторинговая сеть снегомерных маршрутов и агрометеорологических станций весьма разрежена. Поэтому здесь калибровка ключевых параметров модели производилась по данным наблюдений о речном стоке в различных точках русловой сети реки Лены и ее притоков, а валидация модели на независимом материале выполнялась в том числе для гидропостов, которые не были включены в калибровочную серию. Помимо этого, возможности модели по воспроизведению полей гидрологических переменных были привлечены для калибровки по приведенным в СН 435-72 (1972) картам среднемноголетнего модуля стока для территории бывшего СССР. Поле рассчитанных величин среднемноголетнего модуля стока конструируется средствами ГИС по данным моделирования за многолетний период в узлах (центрах тяжести) элементарных водосборов среднесуточных величин эффективного водообразования за счет поверхностного, подповерхностного и грунтового стока в локальную речную сеть. Калибровка параметра высотного градиента осадков для горных областей осуществлялась путем итерационного цикла поиска компромиссного решения, доставляющего максимальную эффективность расчетов как для гидрографов стока, так и для поля среднемноголетнего модуля стока.

Испытания показали, что модель удовлетворительно воспроизводит особенности внутригодового режима и гидрографа стока рек в различных частях бассейна как в регионах с ярко выраженным весенним половодьем, так и в районах с преимущественным чередованием весенне-летних паводков.

Визуальный анализ и оценки с помощью статистических критериев соответствия фактического (по СН 435-72) и рассчитанного по метеоданным модельного полей среднемноголетнего модуля стока в бассейне Лены показали их внешнее подобие с

сохранением пространственного распределения тенденций изменения модуля по территории (Рисунок 4). Получены близкие значения диапазонов изменения модуля стока, осредненных по площади бассейна величин фактического и рассчитанного модуля стока, а также объемов среднегодового стока Лены. Зона с наибольшими погрешностями расчета приурочена к центральной части бассейна Лены с чрезвычайно низкими фактическими значениями модуля стока (многие небольшие реки в этом регионе зимой перемерзают).



а б в

Рисунок 4 – Фактическая (а) и рассчитанная (б) карты среднемноголетнего модуля стока (л/(с*км^2)) и распределение рассчитанных среднемноголетних расходов воды (м^3/с) в речной системе (в) в бассейне р. Лены

Бассейн р. Амура

Площадь водосбора р. Амур составляет 1855 тыс. км^2, в том числе в пределах Российской Федерации – 1003 тыс. км^2, КНР – 820 тыс. км^2 и Монголии – 32 тыс. км^2. Расположение бассейна на территории трех государств существенно усложняет проблему построения и обеспечения региональной гидрологической модели однородными данными гидрометеорологического и водохозяйственного мониторинга. Эта проблема стала особенно актуальной после экстраординарного наводнения 2013 года (Данилов-Данильян и др., 2014; Крыжов, Вильфанд, 2014; Махинов и др., 2014; Семенов и др., 2014, Фролов, Георгиевский, 2014).

Разработанная совместно с А.С. Калугиным на основе модельного комплекса ECOMAG региональная модель формирования стока для бассейна р. Амур учитывает пространственную неоднородность характеристик водосбора путем задания части параметров с привлечением глобальных баз данных о характеристиках рельефа (HYDRO1k), почв (HWSD) и ландшафтов (GLCC). Метеорологическая информация задавалась по данным 232 метеорологических станций (169 из них приходятся на российскую часть бассейна). Калибровка параметров и верификация модели для бассейна р. Амур проводилась для 15

гидропостов (из них 6 на Амуре и 9 на притоках) с площадями водосборов от 8 до 1790 тыс. км^2. Подчеркнем, что модель настраивалась не по отдельным речным бассейнам притоков Амура, а для всего бассейна р. Амур с единым набором параметров.

В диссертации показаны возможности региональной гидрологической модели в бассейне р. Амур для более детального анализа условий формирования экстраординарного паводка 2013 г., чем это может быть сделано на основе данных довольно редкой сети гидрометеорологических наблюдений. В частности, на основе анализа карт пространственного распределения рассчитанных запасов воды в снежном покрове и влажности почвы, карты измеренных осадков и распределения рассчитанного речного стока в бассейне Амура на разные даты в период формирования паводка 2013 г. было оценено влияние основных природных факторов на формирование критического состояния водосбора к началу паводка и экстремального стока в период его прохождения.

Бассейн р. Маккензи

Маккензи – крупнейшая река Арктического бассейна в западном полушарии. Площадь водосбора 1800 тыс. км^2, длина реки 1700 км, но вместе с притоком Атабаска река простирается на 4240 км. К бассейну реки относятся крупнейшие канадские озера – Большое Медвежье (площадь зеркала 31300 км^2), Большое Невольничье (28570 км^2), Атабаска (7850 км^2).

Особенности генезиса формирования стока в бассейне р. Маккензи обусловили необходимость расширения оригинальной версии модели ECOMAG за счет включения двух дополнительныхи блоков модели, первый из которых описывает регулирование речного стока имеющимися в бассейне крупными озерами в виде линейных емкостей с учетом нарастания и таяния ледяного покрова на этих озерах, а второй блок – летнее питание левобережных притоков р. Маккензи за счет таяния ледников и снежников в высокогорных областях.

Пространственное распределение параметров модели задавалось с использованием тех же глобальных баз данных, что и для бассейна р. Амур. Карты пространственных полей среднемноголетних характеристик гидрологического цикла в бассейне р. Маккензи масштаба 1:10000000 были взяты из гидрологического атласа Канады (Hydrological Atlas of Canada, 1978). Для задания метеорологических входов были задействованы метеорологические поля реанализа WATCH (Weedon et al., 2011), представляющие собой глобальные синтетические сеточные архивы погоды с пространственным разрешением 2.5^{o}x2.5^o и суточным временным разрешением за период 1971–2001 гг.

Калибровка и валидация модели выполнялись по суточным гидрографам на 10 гидрометрических постах р. Маккензи и ее притоков. Для большинства из них получено

хорошее и удовлетворительное соответствие результатов за исключением одного поста на притоке, вытекающем из Большого Медвежьего озера (площадь зеркала 31300 км^2).

Построение карт рассчитанных по модели среднемноголетних полей характеристик гидрологического цикла (осадков, стока и испарения) для бассейна р. Маккензи проводилось по той же методике, что и для бассейнов рек Волги и Лены. В узлах (центрах тяжести) расчетных водосборов за многолетний период с суточным шагом по времени выполнялись расчеты слоев осадков по реанализу WATCH, эффективного водообразования за счет поверхностного, подповерхностного и грунтового стока, и суммарного испарения. Эти поля затем осреднялись и с помощью ГИС-технологии строились карты среднемноголетних слоев этих характеристик.

При визуальном сравнении фактических и рассчитанных на основе данных метеорологического реанализа полей характеристик гидрологического цикла (осадков, стока, суммарного испарения) видно, что в бассейне р. Маккензи в целом сохраняется структура пространственного распределения и тенденции изменения полей по территории бассейна. Однако, как показал анализ, из-за погрешностей задания осадков по реанализу и карт фактических среднемноголетних полей (Hydrological Atlas of Canada, 1978), обусловленных, главным образом, слишком низкой плотностью пунктов гидрометеорологических наблюдений, особенно в горах и арктических областях, между фактическими и рассчитанными полями местами отмечаются значительные расхождения, и при недостаточно развитой сети гидрометеорологического мониторинга статистический анализ соответствия этих полей преждевременен.

Глава 5. Новые методы и технологии в задачах управления водноресурсными системами и гидрологических расчетов и прогнозов

В главе показаны возможности новых методов и технологий, созданных на базе физико-математической модели ECOMAG, для модернизации традиционных методов гидрологических расчетов и прогнозов на примере актуальных для нашей страны водохозяйственных задач оценки опасности наводнений и противопаводкового эффекта водохранилищ, управления действующими водноресурсными системами и прогнозов притока воды к водохранилищам.

Оценка опасности наводнений и противопаводкового эффекта водохранилищ

В диссертации представлена компьютерная технология гидроинформационной поддержки управления риском наводнений для оценки противопаводковой функции действующих и планируемых водохранилищ на реках Зее и Бурее и выявления эффекта регулирования этих водохранилищ на снижение максимальных расходов и уровней воды на 850-километровом участке Среднего Амура. Основу технологии составляют три

взаимоувязанных компоненты: (1) физико-математическая модель формирования стока ECOMAG, (2) одномерная гидродинамическая модель неустановившегося движения воды в речном русле, основанная на решении уравнений Сен–Венана, и (3) базы данных гидрометеорологической, водохозяйственной и картографической информации и соответствующие системы управления этими базами. Алгоритм гидроинформационной поддержки схематично сводится к следующему. Сначала с помощью модели ECOMAG рассчитываются гидрографы стока в устьях крупнейших притоков основной реки в зависимости от возможных сценариев гидрометеорологических воздействий, расположения и параметров действующих и планируемых водохранилищ на этих притоках. Затем по гидродинамической модели Сен–Венана осуществляются расчеты гидрографов стока в створах основной реки (Амура), при этом в качестве боковой приточности к участкам русла задаются сценарии гидрографов стока в устьях притоков, рассчитанные по модели ECOMAG. На завершающем этапе проводится анализ результатов моделирования, оцениваются целевые показатели планируемых схем размещения гидроузлов и их характеристик на соответствие требованиям по снижению максимальных уровней, а также экономическая целесообразность строительства водохранилищ, исходя из требований по созданию соответствующих противопаводковых емкостей. При неудовлетворительных результатах алгоритм гидроинформационной поддержки может быть повторен с новыми вариантами размещения планируемых гидроузлов и их характеристик до достижения оптимальных показателей по гидроэкологической безопасности и экономической целесообразности.

Применительно к бассейну Среднего Амура показано, что технология гидроинформационной поддержки позволяет:

- с удовлетворительной точностью рассчитать гидрографы стока на реках Зее и Бурее (с использованием физико-математической модели формирования стока ECOMAG), а также в различных створах 850–километрового участка Среднего Амура (с использованием гидродинамической модели движения паводковой волны в речном русле, реализованной А.С. Калугиным) за многолетний период, включая катастрофический паводок 2013 года;
- оценить эффекты регулирования стока действующими Зейским и Бурейским водохранилищами на гидрологический режим рек Зеи и Буреи ниже расположения гидроузлов и участка Среднего Амура ниже впадения Зеи до впадения Сунгари. В частности, результатами численных экспериментов было показано, что без Зейского и Бурейского водохранилищ последствия наводнения 2013 г. в бассейне Среднего Амура могли быть гораздо более разрушительными, а ущербы – более катастрофичными;
- оценить эффекты регулирования стока с использованием резервных противопаводковых

емкостей на планируемых в ряде проектных материалов Нижне-Зейском и Селемджинском водохранилищах на гидрологический режим реки Зеи и Среднего Амура при различных вариантах максимальных сбросных расходов в нижние бьефы планируемых гидроузлов и различных сценариях метеорологических воздействий на водосбор.

Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ

С начала 2000-х годов при поддержке МПР России и Росводресурсов разрабатывалась и совершенствовалась методология по экономически обоснованному и экологически безопасному управлению водными ресурсами речных бассейнов с каскадами водохранилищ комплексного назначения. Прикладная часть этой методологии реализована в виде компьютерной технологии, включающей ИМК ECOMAG, которая в комплексе с моделью функционирования водохозяйственных систем VOLPOW, разработанной С.Е. Беднаруком, с 2004 г. используется в целях информационного обеспечения поддержки принятия оптимальных управленческих решений по регулированию режимов работы Волжско-Камского каскада водохранилищ в оперативной практике Федерального агентства водных ресурсов.

Алгоритм процесса принятия решений схематично сводится к следующему. На начальном этапе с помощью компьютерной технологии с использованием всей имеющейся оперативной информации о состоянии водных объектов и гидротехнических сооружений, архивной и прогностической гидрометеорологической информации, нормативных документов, регламентирующих режимы работы водохранилищ, и текущих требований водопользователей разрабатываются предложения по режимам работы водохранилищ. Эти предложения рассматриваются и обсуждаются на заседаниях Межведомственной рабочей группы (МРГ) по регулированию режимов работы водохранилищ, в состав которой входят представители заинтересованных министерств и ведомств, органов исполнительной власти субъектов РФ, а также крупнейших компаний водопользователей. После обсуждения предложений на заседаниях МРГ на основании выработанных группой рекомендаций Руководителем МРГ принимаются решения по конкретным режимам работы каждого из водохранилищ каскада, которые в виде указаний доводятся до Системного оператора Единой энергосистемы и оттуда поступают в виде директивных указаний на гидроузлы ГЭС.

Алгоритм долгосрочного стратегического планирования режимов работы Волжско-Камских гидроузлов с помощью разработанной технологии сводится к проведению следующих двух основных этапов:

1. С помощью программного комплекса ECOMAG по модели формирования стока выполняется серия сценарных (ансамблевых) прогнозов боковой приточности к водохранилищам каскада на период заблаговременности до трех месяцев;
2. На основе сценарных расчетов бокового притока по имитационной водохозяйственной модели с помощью программного комплекса VOLPOW рассчитываются возможные режимы работы гидроузлов Волжско-Камского каскада.

Долгосрочный прогноз бокового притока воды к водохранилищам ВКК. Долгосрочные прогнозы по модели ECOMAG проводятся по оперативным метеорологическим данным (метеосводкам), в непрерывном режиме поступающим по каналам связи из Росгидромета (на территории бассейна Волги задействовано около 350 оперативных метеостанций). Результаты расчетов гидрографов притока воды к каждому из водохранилищ ВКК контролируются по данным из оперативной базы Системного оператора ЕЭС по притоку воды в Волжско-Камские водохранилища.

Проведение сценарных (ансамблевых) прогнозов притока воды в водохранилища ВКК и бокового притока к участкам русла по модели ECOMAG сводится к выполнению следующих этапов.

1. Проводятся гидрологические расчеты по фактической и прогностической (на ближайшие 6 дней по данным Росгидромета) метеоинформации до даты окончания метеорологического прогноза.
2. Сценарии формирования стока и ансамбли гидрографов боковой приточности к водохранилищам и отдельным участкам русел на последующий период (например, до конца текущего или следующего квартала) рассчитываются по модели ECOMAG по сценариям развития метеорологических процессов за аналогичный календарный период в предыдущие годы.

Решение задачи пропуска весеннего половодья наиболее рациональным (оптимальным) образом осуществляется на основе многовариантных расчетов режимов работы гидроузлов каскада для всего диапазона возможных гидрологических условий (прогнозируемых Росгидрометом и ансамблевых по модели ECOMAG) с помощью имитационной модели VOLPOW.

За время оперативной эксплуатации технологии в 2004–2016 гг. получены удовлетворительные оценки оправдываемости долгосрочных прогнозов притока к водохранилищам ВКК во втором квартале и объемов весеннего спецпопуска из Волгоградского водохранилища (значения критерия S/σ составили соответственно 0.75 и 0.59).

В середине 2000-х годов были организованы и развернуты широкомасштабные работы по адаптации этой системы для других речных бассейнов (Ангаро-Енисейскому каскаду водохранилищ, к бассейнам рек Лены и Амур, к бассейну реки Кубань с ее сложной водохозяйственной системой) и ее детализации для меньших подбассейнов и соответствующих водохозяйственных систем в пределах Волжско-Камского бассейна.

Методы краткосрочного прогноза притока воды в водохранилища с использованием метеорологических прогнозов (на примере Чебоксарского и Бурейского водохранилищ)

В течение ряда последних лет под эгидой ОАО РусГидро разрабатывается методология оптимизационных расчетов режимов работы гидроузлов в увязке с развитием гидрологической обстановки (Лапин, Жиркевич, 2014). Одной из целей проведения таких исследований является повышение точности определения притока воды в водохранилища на краткосрочном уровне планирования водно-энергетических режимов. На основе ИМК ECOMAG были разработаны методики и технологии краткосрочного прогноза притока воды в Бурейское и Чебоксарское водохранилища с заблаговременностью от одних до семи суток с использованием прогнозных метеорологических данных.

Между смоделированными по откалиброванным моделям формирования стока и фактическими гидрографами всегда есть различия, обусловленные как неадекватностью гидрологических моделей, так и неточностями в задании входной метеорологической информации и в определении «фактических» гидрографов, по которым оценивается эффективность гидрологических расчетов. Поэтому в целях уточнения расчетов по моделям на период заблаговременности краткосрочных гидрологических прогнозов необходимо вносить поправки, связанные с усвоением вновь поступающей гидрометеорологической информации и корректировкой модельных прогностических расчетов.

Один из способов усвоения поступающей информации для корректировки гидрологических прогнозов заключается в предположении инерционности ошибок прогноза, когда разница между рассчитанным и фактическим гидрографами на дату выпуска прогноза «разбрасывается» с определенными весами на даты заблаговременности прогноза (Кучмент, 1981).

Технология проведения прогностических расчетов формирования стока и притока воды в водохранилища включает проведение следующих этапов.

1. Ежедневно специальный компонент информационно-моделирующей подсистемы (ИМП) обращается к поставщикам гидрометеорологических наблюдений и метеорологических прогнозов по сети Интернет и пополняет и обновляет имеющиеся массивы в базах данных;

2. С использованием краткосрочного метеорологического прогноза проводятся прогностические расчеты притока воды в водохранилища с заблаговременностью до 7 дней.

Эти выходные данные работы ИМП являются входной информацией для имитационных моделей регулирования режимов работы гидроузлов на краткосрочную перспективу.

Источниками фактической метеоинформации для ИМП являются интернет-сервисы Росгидромета. Прогностические поля метеоданных пополняются из двух источников: мезомасштабной атмосферной модели WRF и адаптированных для территории РФ прогнозов по модели общей циркуляции атмосферы ECMWF. Для корректировки и проверки гидрологических прогнозов используются данные о суточном фактическом притоке воды к Бурейскому и Чебоксарскому водохранилищам, размещенные на сайте ОАО РусГидро.

Опытные оперативные испытания методики краткосрочного прогноза притока воды к Бурейскому водохранилищу проводились в течение 2016 г., а к Чебоксарскому водохранилищу - в 2018 г (Рисунок 5). Результаты оперативных гидрологических прогнозов по критерию S/σ следует признать удовлетворительными.

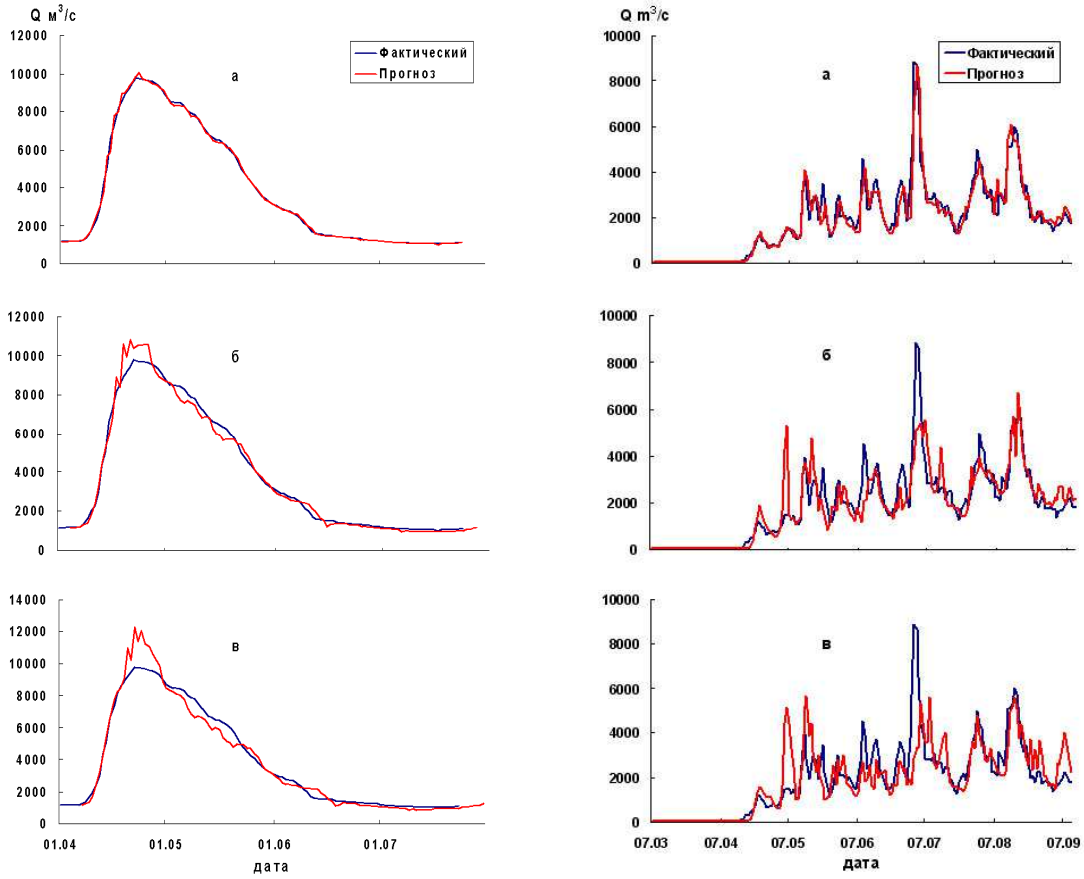


Рисунок 5 – Фактические и прогнозные гидрографы притока к Чебоксарскому водохранилищу в 2018 г. (слева) и притока к Бурейскому водохранилищу в 2016 г. (справа) с заблаговременностью 1 сутки (а), 4 суток (б) и 7 суток (в)

ВЫВОДЫ

1. Разработаны детальные физико-математические модели с распределенными параметрами, описывающие процессы вертикального тепло- и влагопереноса в снежном покрове при его формировании и таянии, в мерзлой почве при инфильтрации в нее талых вод. Предложены методы численной реализации уравнений, формулы для расчета гидро- и физических характеристик почвогрунтов и снежного покрова. С использованием разработанных моделей гидротермического режима снега и почвы реализована первая детальная физико-математическая модель формирования стока весеннего половодья на примере водосбора одного из притоков Дона. Проведены испытания модели и выполнены оценки влияния возможных антропогенных и климатических изменений на характеристики талого стока и водную эрозию. На основе пространственного интегрирования уравнений детальных физико-математических моделей тепло- и влагопереноса получены упрощенные модели гидротермического режима снега и почвы для их использования в крупномасщтабных моделях формирования стока.
2. Разработаны физико-математическая модель формирования стока в крупных речных бассейнах ECOMAG с описанием основных стокообразующих процессов на водосборах со смешанным дождевым и снеговым питанием рек и Информационно-моделирующий комплекс (компьютерная технология), включающий средства информационной и технологической поддержки работы расчетного модуля модели. Имеющиеся информационные ресурсы по объему и пространственному покрытию территории России достаточны для проведения расчетов для любых крупных речных бассейнов России. Привлечение и адаптация для информационного обеспечения модели международных глобальных баз данных характеристик подстилающей поверхности позволяет расширить область применения модели и на зарубежные речные бассейны. Модель ECOMAG с соответствующим программным, информационным и технологическим обеспечением является инструментом для построения региональных моделей крупных речных бассейнов.
3. Разработаны методы задания и калибровки полей модельных параметров в зависимости от плотности сети гидрометеорологического мониторинга, а также критерии для оценки соответствия фактических и рассчитанных полей характеристик гидрологического цикла.
4. Проведены первые комплексные испытания модели ECOMAG, методов задания и калибровки модельных параметров, исследование возможностей модели по учету пространственных неоднородностей в процессах формирования стока на региональном уровне на основе данных детальных полевых и экспериментальных исследований в рамках междисциплинарного международного эксперимента NOPEX. Всесторонние испытания

модели показали, что гидрологическая модель может быть использована с единым набором региональных параметров для расчетов гидрографов стока и других характеристик гидрологического цикла как на изученных, так и неизученных речных бассейнах в условиях меняющегося климата и при антропогенных изменениях речных бассейнов в широком диапазоне размеров моделируемых объектов: от достаточно крупных рек до мелких ручьев.

5. На основе модели ECOMAG с соответствующей информационно-технологической поддержкой построены региональные модели формирования стока для четырех крупнейших речных бассейнов северного полушария, расположенных в различных физико-географических зонах с различными условиями формирования стока, типами питания и гидрологического режима водных объектов: Волги, Лены, Амура и Маккензи. Для каждого бассейна испытания региональных моделей включали проверку на многолетних гидрографах стока в различных створах речной сети как входивших, так и не входивших в калибровочные серии. Впервые показаны возможности анализа динамики рассчитанных с помощью моделей полей характеристик гидрологического цикла (снежного покрова, влажности почвы, испарения, речного стока), которые позволяют использовать региональные модели как современные инструменты решения исследовательских задач гидрологии речных бассейнов, связанных с анализом условий формирования стока в различных частях водосборов и оценкой полей изменений стока при антропогенных воздействиях на водосбор и возможных изменениях климата.
6. Разработаны новые методы и технологии решения актуальных для нашей страны задач управления водноресурсными системами, гидрологических расчетов и прогнозов.
   - Разработана компьютерная технология гидроинформационной поддержки управления риском наводнений для оценки противопаводковой функции действующих и планируемых водохранилищ. Алгоритм гидроинформационной поддержки позволяет в зависимости от возможных сценариев гидрометеорологических воздействий, расположения и параметров действующих и планируемых водохранилищ осуществлять расчеты гидрографов стока в различных точках речной сети, на основании которых оцениваются целевые показатели схем размещения гидроузлов на соответствие требованиям по гидроэкологической безопасности и экономической целесообразности строительства. Технология апробирована применительно к бассейну Среднего Амура
   - Разработана компьютерная технология для информационного обеспечения поддержки принятия оптимальных управленческих решений по регулированию режимов работы каскадов водохранилищ комплексного назначения в оперативной практике

Федерального агентства водных ресурсов. Технология состоит из двух основных взаимоувязанных компонентов: программного комплекса математического моделирования формирования речного стока ECOMAG и программного комплекса математического моделирования функционирования водохозяйственных систем с каскадами водохранилищ VOLPOW (разработчик С.Е. Беднарук), а также информационно-технологических ресурсов, поддерживающих работу этих компонентов. Создание технологии направлено на решение задач повышения экономической эффективности и экологической безопасности функционирования водохозяйственного комплекса страны, поставленных в Водной стратегии Российской Федерации до 2020 года.

- В рамках технологии долгосрочного стратегического планирования режимов работы Волжско-Камских гидроузлов с помощью программного комплекса ECOMAG разработаны модели формирования стока для каждого из водохранилищ Волжско-Камского каскада и методики и технологии проведения сценарных (ансамблевых) долгосрочных прогнозов боковой приточности к водохранилищам на период заблаговременности до 3 месяцев. За время оперативной эксплуатации технологии в 2004–2016 гг. получены удовлетворительные оценки оправдываемости долгосрочных прогнозов притока к водохранилищам ВКК во втором квартале и объемов весеннего спецпопуска из Волгоградского водохранилища. Использование ансамблевого прогноза притока воды к водохранилищам при решении задач управления водохозяйственными системами позволяет разработать более гибкий режим управления с учетом риска при вероятных ошибках прогноза.
- На базе модели ECOMAG разработаны методы и технологии краткосрочного прогноза притока воды в водохранилища с заблаговременностью до семи суток с использованием прогнозных метеорологических данных (что особенно важно в условиях сокращения плотности гидрологической сети) и с учетом оперативной корректировки модельных прогностических расчетов на основе усвоения вновь поступающей гидрометеорологической и водохозяйственной информации. Технологии предназначены для повышения точности определения притока воды в водохранилища на краткосрочном уровне планирования водно-энергетических режимов работы гидроузлов (по заданию ОАО РусГидро) и реализованы на примере водосборов Бурейского и Чебоксарского водохранилищ. Проведены годичные оперативные испытания методов краткосрочного прогноза с удовлетворительными результатами.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., **Мотовилов Ю.Г.** Формирование речного стока (Физико-математические модели). – М.: Наука, 1983. – 216 с.
2. 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.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

3. 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.
4. Калугин А.С., **Мотовилов Ю.Г.** Модель формирования стока для бассейна р. Амур // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45. № 2. – С. 121–132.
5. **Мотовилов Ю.Г.**, Фащевская Т.Б. Пространственно распределенная модель формирования стока тяжелых металлов в речном бассейне // Вода: химия и экология. – 2018. – № 1-3. – С. 18–31.
6. **Мотовилов Ю.Г.** Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 2. – С. 78–88.
7. Беднарук С.Е., **Мотовилов Ю.Г.** Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство. – 2017. – № 7. – С. 22-35.
8. 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 Гидрометцентра России. – 2017. – Вып. 366. – С. 68–86.
9. **Мотовилов Ю.Г**., Балыбердин В.В., Гарцман Б.И., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Соколов О.В. Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ECOMAG с использованием метеорологических прогнозов // Водное хозяйство России. – 2017. – № 1. – С. 78-102.
10. **Мотовилов Ю.Г.** Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1 Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы. – 2016. – Том 43. № 3. – С. 243–253.
11. **Мотовилов Ю.Г.** Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2 Результаты испытаний // Водные ресурсы. – 2016. – Том 43. № 5. – С. 467–475.
12. **Мотовилов Ю.Г.**, Данилов-Данильян В.И., Дод Е.В., Калугин А.С. Оценка противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура на основе физико-математических гидрологических моделей // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42. № 5. – С. 476–491.
13. 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.
14. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Демидов В.Н., **Мотовилов Ю.Г.**, Назаров Н.А., Смахтин В.Ю. Применение физико-математических моделей формирования стока для

оценки степени опасности катастрофических наводнений // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 4. – С. 93–100.

15. Кучмент Л.С., **Мотовилов Ю.Г.**, Старцева З.П. Моделирование влагопереноса в системе почва-растительность-приземный слой атмосферы для гидрологических задач // Водные ресурсы. – 1989. – № 2. – С. 32–39.

16. Жидков В.А., **Мотовилов Ю.Г.** Численное моделирование характеристик снеготаяния // Материалы гляциологических исследований. – 1987. – Вып. 59. – С. 157-160.

17. **Мотовилов Ю.Г.**, Жидков В.А. Моделирование характеристик снежного покрова в периоды его формирования и таяния // Материалы гляциологических исследований. – 1986. – Вып. 56. – С. 50–56.

18. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., **Мотовилов Ю.Г.**, Смахтин В.Ю. Система физико-математических моделей гидрологических процессов и опыт ее применения к задачам формирования стока // Водные ресурсы. – 1986. – Т. 13. № 5. – С.24–36.

19. **Мотовилов Ю.Г.**, Старцева З.П. Численное моделирование влагообмена между деятельным слоем почвы и атмосферой // Метеорология и гидрология. – 1985. – № 6. – С. 85–93.

20. **Мотовилов Ю.Г.**, Музылев Е.Л., Назаров Н.А., Оганесян А.Е. Исследование формирования талого стока горных рек Чаткальского хребта // Материалы гляциологических исследований. – 1983. – Вып. 47. – С.104–109.

21. **Мотовилов Ю.Г.** Оценка влияния водяного пара на гидротермический режим мерзлых почвогрунтов // Труды Гидрометцентра СССР. – 1981. – Вып. 240. – С. 82–93.

22. **Мотовилов Ю.Г.** Расчет основной гидрофизической характеристики почв по данным о почвенно-гидрологических константах // Метеорология и гидрология. – 1980. – №12. – С. 93–101.

23. **Мотовилов Ю.Г.** Моделирование потерь талых вод на инфильтрацию в почву // Труды Гидрометцентра СССР. – 1979. – Вып. 218. – С. 22–32.

24. **Мотовилов Ю.Г.** Численное моделирование процесса инфильтрации воды в мерзлые почвы // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 9. – С. 67–75.

25. **Мотовилов Ю.Г.** Математическая модель инфильтрации воды в мерзлые почвогрунты // Труды Гидрометцентра СССР. – 1977. – Вып. 191. – С. 18–28.

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК рецензируемых научных изданий, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

26. Bugaets A., Gartsman B., Gelfan A., **Motovilov Yu.**, Sokolov O., Gonchukov L., Kalugin A., Moreido V., Suchilina Z. and Fingert E. The integrated system of hydrological forecasting in the Ussuri River basin based on the ECOMAG model // Geosciences. – 2018. – Vol. 8. No. 5. – 12 p. DOI: 10.3390/geosciences8010005

27. Gelfan A., Moreydo V., **Motovilov Y.**, and 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. – Vol. 22. – P. 2073–2089.

28. Hattermann F.F., Vetter T., Breuer L., Buda Su., Daggupati P., Donnelly C., Fekete B., Flörke F., Gosling S.N., Hoffmann P., Liersch S., Masaki Y., **Motovilov Y.**, Müller C., Samaniego L, Stacke T., Wada Y., Yang T. and Krysanova V. Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: A cross-scale study // Environmental Research Letters. – 2018. Vol. 13. No. 1(015006). – 14 p. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9938

29. Hattermann F.F. Krysanova V., Gosling S. N., Dankers R., Daggupati P., Donnelly C., Flörke

M., Huang S. **Motovilov Y.**, Buda S. et al. Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins // Climatic Change. – 2017. – Vol. 141. Issue 3. – P. 561–576.

30. Gelfan A., Gustafsson D., **Motovilov Yu.**, Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues // Climatic Change. – 2017. – Vol. 141. – P. 499–515.

31. Krylenko I., **Yu. Motovilov**, E. Antokhina, V. Zhuk & G. Surkova. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions // IAHS Publ. – 2015. – No. 368. – P. 156–161.

32. Gelfan1 A.N., **Yu.G. Motovilov**, and V.M. Moreido. Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir // Proc. IAHS. – 2015. – No. 369. – P. 115–120.

33. Gelfan A., **Motovilov Yu.**, Krylenko I., Moreido V., Zakharova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions // Hydrological Sciences Journal. – 2015. – Vol. 60. No. 7-8. – P. 1266–1285.

34. **Motovilov Y.**, V. Danilov-Danilyan, E. Dod, and A. Kalugin. Flood protection effect of the existing and projected reservoirs in the Amur River basin: evaluation by the hydrological modeling system // Proc. IAHS. – 2015. – No. 370. – P. 63–67.

35. Gelfan A.N, Semenov V.A., **Motovilov Yu.G.** Climate noise effect on uncertainty of hydrological extremes: numerical experiments with hydrological and climate models // Proc. IAHS, 2015. – No. 369. – P. 49–53.

36. Gelfan A., V. Semenov, E. Gusev, **Y. Motovilov**, O. Nasonova, I. Krylenko, and E. Kovalev. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // Hydrology and Earth System Sciences. – 2015. – Vol. 19. – P. 2737–2754.

37. **Motovilov Yu.G.** ECOMAG: a distributed model of runoff formation and pollution transformation in river basins solution // IAHS Publ. – 2013. – No. 361. – P. 227–234.

38. Barenboim G.M., Danilov-Danilyan V.I., Gelfan A.N., **Motovilov Yu.G.** On the problems of water quality in Russia and some approaches to their solution // IAHS Publ. – 2013. – No. 361. – P. 77–86.

39. **Motovilov Yu.G.**, Gelfan A.N. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches // IAHS Publ. – 2013. – No. 360. – P. 105–112.

40. Gelfan A.N., **Motovilov Yu.G.** Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospects // Geography Compass. – 2009. – Vol. 3. Issue 5. – P. 1841–1864.

41. Gottschalk L., S. Beldring, K. Engeland, L.Tallaksen, N.R. Salthun, S. Kolberg and **Yu. Motovilov**. Regional/macroscale hydrological modeling: a Scandinavian experience // Hydrological Sciences Journal. – 2001. – Vol. 46. No. 6. – P. 963–982.

42. **Motovilov Yu.G.**, L. Gottschalk, K. Engeland and A. Rodhe. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // Agricultural and Forest Meteorology. – 1999. – Vol. 98. No. 99. – P. 257–277.

43. Gottschalk L., Batchvarova E., Gryning S.-E., Lindroth A., Melas D., **Motovilov Yu.**, Frech M., Heikinheimo M. et al. Scale aggregation - comparison of flux estimates from NOPEX // Agricultural and Forest Meteorology. – 1999. – Vol. 98. No. 99. – P. 103–119.

44. **Motovilov Yu.G.** Simulation of climate change impacts on river runoff: coupling of historical and modelling approaches // Proc. of the Second Int. Conference on Climate and Water, Helsinki, August 1998. – 1998. – Vol. 1. – P. 223–232.

45. Kuchment L.S., V.N. Demidov, **Yu.G. Motovilov**, N.A. Nazarov, V.Yu. Smakhtin. Estimation of disastrous floods risk via physically-based models of river runoff generation // IAHS Publ. – 1993. – No. 213. – P. 177–182.

46. **Motovilov Yu.G.**, Nazarov N.A. Modelled estimates of changes in the water balance of forested northern river basins // Northern hydrology: Selected Perspectives. Proc. North. Hydr. Symp., July, 1990. – Saskatoon, Saskatchewan, Canada, NHRI Symp., 1991. – No 6. – P. 499–514.

47. Vehvilainen.B., **Motovilov Yu.G.** Simulation of soil frost depth and effect on runoff // Nordic Hydrology. – 1989. – Vol. 20. – P. 9–24.

48. Kuchment L.S., **Yu.G. Motovilov**, Z.P. Startseva. Sensitivity of evapotranspiration and soil moisture to possible climatic changes // Proc. Conference on Climate and Water, Sep. 1989. Helsinki, 1989. – Vol. 1. – P. 236–251.

49. **Motovilov Yu.G.** Modelling the effects of agrotechnical measures on spring runoff and water erosion // IAHS Publ. – 1987. – No. 166. – P. 241–251.

50. Kuchment L.S., **Yu.G. Motovilov**, E.L. Muzylev, N.A. Nazarov. Estimates of possible variations of snowmelt-runoff characteristics on climatic changes // IAHS Publ. – 1987. – No. 166. –P. 129–138.

51. **Motovilov Yu.**, B. Vehvilainen. Snow cover and snowmelt runoff model in the forest zone // Proc. Intern. Soviet-Finnish Symp. in Water Research in Moscow, 1986. – Helsinki, 1987. – P. 84–100.

52. Kuchment L.S., V.N. Demidov, **Yu.G. Motovilov**. A physically-based model of the formation of snowmelt and rainfall runoff // IAHS Publ. – 1986. – No. 155. – P. 27–36.

53. **Motovilov Yu.G.** A model of snowcover formation and snowmelting // IAHS Publ. –1986. – No. 155. – P. 47–57.

Статьи в других изданиях:

54. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Лавренов А.А., **Мотовилов Ю.Г.** Гидрологические последствия изменения климата в крупных речных бассейнах: опыт совместного использования региональной гидрологической и глобальных климатических моделей // Вопросы географии. – 2018. – Вып. 45. – С. 49–63.

55. **Мотовилов Ю.Г.** Моделирование полей характеристик речного стока // Избранные труды Института водных проблем РАН: 1967–2017: В 2-х т. – М., КУРС. – 2017. – Т. 2. – С. 47–70.

56. **Мотовилов Ю.Г.**, Бугаец А.Н., Гарцман Б.И., Гончуков Л.В., Калугин А.С., Лупаков С.Ю., Морейдо В.М., Сучилина З.А., Фингерт Е.А. Моделирование формирования стока в бассейне р. Уссури на базе модели ECOMAG // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения». – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 247–252.

57. Бугаец А.Н., **Мотовилов Ю.Г.**, Гончуков Л.В., Соколов О.В., Гарцман Б.И., Калугин А.С., Морейдо В.М., Фингерт Е.А. Сучилина З.А. Разработка интегрированной системы гидрологического мониторинга на базе модели ECOMAG для бассейна р. Уссури // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 495–500.

58. Гельфан А.Н., **Мотовилов Ю.Г.**, Калугин А.С., Крыленко И.Н., Лавренов А.А., Меркулов Н.А. Анализ чувствительности максимального речного стока к изменению климатических условий его формирования // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 53–59.

59. Гельфан А.Н., Калугин А.С., **Мотовилов Ю.Г.** Сравнение двух методов задания климатических проекций в региональную гидрологическую модель (на примере бассейна

р. Амур) // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 150–155.

60. **Мотовилов Ю.Г.**, Попова Н.О. Моделирование поля нормы речного стока (на примере бассейна реки Камы) // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 90–95.

61. Бугаец А.Н., **Мотовилов Ю.Г.**, Беликов В.В., Гельфан А.Н., Гончуков Л.В., Дод Е.В., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Морейдо В.М., Норин С.В., Румянцев А.Б., Сазонов А.А. Построение интегрированной системы гидрологического моделирования с применением стандарта OpenMI для задач управления риском наводнений (на примере Среднего Амура) // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»: сборник научных трудов. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. – Т. 2. – С. 12–20.

62. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., **Мотовилов Ю.Г.**, Калугин А.С. Моделирование формирования катастрофического наводнения 2013 г. в бассейне Амура // В кн. «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации (сборник докладов)». – М.: Росгидромет. – 2014. – С. 121–147.

63. **Мотовилов Ю.Г**., Дод Е.В., Калугин А.С. Использование гидроинформационной технологии для оценки противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура // Тр. 7-й Международной научно-практической конференции «Динамика и термика водохранилищ и прибрежной зоны морей». – М.: РУДН, 2014. – Т. 1. – С. 176–187.

64. Гельфан А.Н., **Мотовилов Ю.Г.** Развитие методов оценки риска и долгосрочного прогноза весеннего половодья на основе динамико-стохастической модели его формирования. // Сб. трудов Третьей открытой конф. НОЦ. – М.: МГУ, ИВП РАН, 2014. – С.145–163.

65. **Мотовилов Ю.Г.** Моделирование полей влажности почвы для крупных речных бассейнов (на примере бассейна Волги) // Материалы Всероссийской научной конференции «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз». – Новочеркасск: ООО «Лик», 2013. – С. 198–205.

66. **Мотовилов Ю.Г.** Состояние и перспективы гидрологического моделирования речных бассейнов России на основе комплекса ECOMAG // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы 3-й всероссийской конференции с международным участием. – Барнаул, 2010. – С. 530–532.

67. Даценко Ю.С., **Мотовилов Ю.Г.**, Пуклаков В.В. Моделирование гидроэкологического режима Камского водохранилища // Тр. 3-й международной научно-практической конференции «Экология речных бассейнов». – Владимир, 2005. – С. 360–369.

68. **Мотовилов Ю.Г.**, Дмитриев Е.С., Беднарук С.Е., Герасимов С.В., Егоров В.М. Автоматизированная информационно-управляющая система (АИУС) «Водные ресурсы» // В сб. «Водные ресурсы. Проблемы и пути их решения». – Йошкар-Ола, 2003. – С. 17–40.

69. **Мотовилов Ю.Г.**, Белокуров А.С. Моделирование процессов переноса и трансформации загрязнений в речном бассейне для задач экологического мониторинга // Тр. ИПГ. – 1997. – Вып. 81. – С. 49–60.

70. **Мотовилов Ю.Г.** Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов. – М.: РАН, 1993. – С. 9–37.

71. **Мотовилов Ю.Г.** Модель формирования талого стока равнинных рек // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов. – М.: РАН, 1993. – С. 148–155.

72. Доброумов Б.М., **Мотовилов Ю.Г.** Методы расчета стока весеннего половодья // Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – Т.6. – С. 307-317.

73. **Мотовилов Ю.Г.** Физико-математическая модель формирования талого стока // Тр. V Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – Т.6. – С. 359-367.

74. **Мотовилов Ю.Г.**, Назаров Н.А., Смахтин В.Ю. Моделирование возможных изменений стока и качества воды в результате антропогенной деятельности на речных бассейнах (на примере Украинского Полесья) // Тр. XIV Конф. придунайских стран по гидрологическим прогнозам. – Киев, 1988. – С. 124–135.

75. Демидов В.Н., **Мотовилов Ю.Г.** Физико-математическая модель талого и дождевого стока // Материалы XII Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. – Братислава, 1984.

76. **Мотовилов Ю.Г.** Метод расчета фазового состава почвенной влаги при отрицательных температурах // Сборник докладов Второй Всесоюзной конференции молодых ученых Гидрометслужбы СССР. – М., 1977. – С. 78–82.

77. **Мотовилов Ю.Г.** Применение математической модели инфильтрации воды в мерзлую почву к задаче о расчете объема поверхностного стока весеннего половодья // Экспресс-информация ВНИИГМИ-МЦД. Серия: Гидрология суши. – 1977. – Вып. 3(50).

78. **Motovilov Yu.G.**, Georgiadi A.C. Modelling the Changes in Hydrological Cycle Processes for Small and Middle River Basins in Conditions of Permafrost under Climate Change // Coupled models for the hydrological cycle: Integrating atmosphere, biosphere and pedosphere. – Springer Berlin Heidelberg, 2005. – P. 236–241.

79. **Motovilov Yu.G.** Simulation of climate change impacts on river runoff: 1. Certainties and uncertainties; 2. Coupling of historical and modelling approaches // The Fourth International Conference on Global Continental Palaeohydrology-GLOCOPH. Institute of Geography RAS, 2000. – P. 99–107.

80. **Motovilov Yu.G.**, L. Gottschalk, K. Engeland and A. Belokurov. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. – Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series no.105, May 1999. – 88 p.

81. **Motovilov Yu.G.**, Belokurov A.S. ECOMAG - river basin hydrological cycle model on the basis of landscape units: Application for northern watersheds // Proc. the Third International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME, Cheju, Korea, March 1997. – P. 134–139.

82. Gottschalk L., S.-E. Grying, **Yu. Motovilov**, S. Beldring. NOPEX modelling activities: towards a coupled hydrological and meteorological mesoscale model // Fifth Meeting of the BALTEX SSG, Riga, Latvia, April 1997. – Int. BALTEX Secreteriat Publ., 1998. – Vol. 10. – P. A33–A42.

83. **Motovilov Yu.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.

84. Vehvilainen B., **Motovilov Yu.G.** Simulation of soil frost. depth and effect on runoff // Nordisk hydrologisk konferens 1988, Helsinki, Finland, NHP-report 22, 1988. – P. 150–166.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

85. **Мотовилов Ю.Г.** ECOMAG-HM // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660255. Дата гос. регистрации 21 августа 2018 г.

86. **Мотовилов Ю.Г.** ECOMAG // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610703. Дата гос. регистрации 9 января 2013 г.

87. **Мотовилов Ю.Г.** Модель инфильтрации воды в мерзлую почву (программа для ЭВМ) // Аннотированный перечень новых поступлений в ОФАП Госкомгидромета. – Обнинск, 1981. – Вып. 4.

88. **Мотовилов Ю.Г.** Расчет тепло- и влагопереноса в сухом снеге (программа для ЭВМ) // Аннотированный перечень новых поступлений в ОФАП Госкомгидромета. – Обнинск, 1980. – Вып. 2.