ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
И Н С Т И Т У Т В О Д Н Ы Х П Р О Б Л Е М
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИВП РАН)

(на правах рукописи)

Направление подготовки: 05.06.01, Науки о Земле
Направленность (профиль) подготовки: 25.00.27, Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия
Форма обучения: очная

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
«Моделирование генетических составляющих речного стока для водосбора Можайского водохранилища»

Аспирант: Сучкова Ксения Викторовна
_____
(подпись аспиранта)
Научный руководитель: ФИО, ученая степень, ученое звание, должность: Мотовилов Юрий Георгиевич, к.г.н., в.н.с _____
_____
(подпись научного руководителя)

Москва 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ **3**

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ **6**

2. КРАТКОЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БАССЕЙНА МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА **11**

3. МОДЕЛЬ ECOMAG, ЕЁ СТРУКТУРА И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ **20**

3.1 Модель формирования речного стока ECOMAG 20

3.2 ИМК ECOMAG 26

3.3 Пространственная схематизация водосбора. 28

4. АДАПТАЦИЯ ИМК ECOMAG ДЛЯ БАССЕЙНА МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА 31

4.1 Состав и структура информационного обеспечения модели 31

4.2 Калибровка модельных параметров и валидация модели 35

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ **38**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ **50**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ **51**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Пространственно-распределенные физико-математические модели формирования речного стока находят все большее применение в решении широкого круга прикладных и научно-исследовательских гидрологических и гидрохимических задач. Физико-математические модели содержат большое количество хорошо интерпретируемых с физической точки зрения параметров, зависящих от рельефа, типов почв, растительности, землепользования. Начальные значения параметров уточняются в процессе калибровки таким образом, чтобы результаты моделирования как можно ближе воспроизводили данные наблюдений (например, гидрографы стока). К сожалению физико-математические модели, как и модели других типов, также уязвимы к известному недостатку калибровки - к проблеме эквифинальности - близости результатов моделирования с различными значениями наборов модельных параметров [19, 20].

Эквифинальность в значительной степени обусловлена недостатком данных для калибровки физически обоснованных параметров, связанных с отдельными процессами гидрологического цикла. Часть параметров в подмоделях подповерхностного и грунтового стекания трудно поддаются оценке в природных условиях и обычно калибруются по данным наблюдений за стоком. Сток в замыкающем створе водосбора отражает интегральную реакцию сложной системы речного бассейна на внешние воздействия, связан со всеми происходящими на водосборе частными процессами, а, следовательно, и со множеством параметров модели. Чисто математически можно подобрать большое количество наборов калибровочных параметров, примерно с одинаковой точностью воспроизводящих гидрограф в замыкающем створе. Иными словами, при попытке нахождения параметров по ограниченному набору данных наблюдений решение обратного моделирования методом проб и ошибок может быть не единственным [8].

Эквифинальность является одним из главных недостатков калибровки параметров пространственно распределенных гидрологических моделей. Представим себе два различных набора параметров, доставляющих примерно одинаковую точность моделирования стока. По сути они представляют собой модели двух разных речных бассейнов с близкой интегральной реакцией на внешние воздействия. При различных наборах параметров гидрограф в замыкающем створе водосбора может быть

сформирован различными сочетаниями смоделированных генетических составляющих речного стока: к примеру, в одном случае в суммарном гидрографе может превалировать подповерхностный сток, в другом наборе данных такой же гидрограф может быть сформирован сочетанием поверхностной и грунтовой составляющих. Поведение модельных генетических составляющих речного стока в обоих случая совершенно различно, хотя интегральная реакция водосбора примерно одинакова. И хотя для многих гидрологических задач важным является именно моделирование интегральной реакции водосбора (гидрографа в замыкающем створе), в гидрохимических исследованиях формирования качества речных вод корректное моделирование генетических составляющих речного стока играет определяющую роль [10].

В гидрологии известны различные методы графического расчленения гидрографов стока на генетические составляющие (метод Куделина Б.И., Полякова Б.В., Львовича М.И., Попова О.В. и др.). Большинство из этих методов представляют схемы разделения вод на качественном уровне. Более объективная картина определения генетических составляющих стока достигается с помощью гидрохимических способов идентификации водных масс.

Целью настоящего исследования является разработка и адаптация физико-математической модели формирования речного стока для бассейна Можайского водохранилища на основе информационно-моделирующего комплекса (ИМК) ECOMAG и моделирование генетические составляющих стока с учетом гидрохимических способов идентификации водных масс при калибровке параметров модели.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке и адаптации пространственно-распределенной физико-математической модели формирования стока с описанием основных стокообразующих процессов на водосборе Можайского водохранилища со смешанным дождевым и снеговым питанием рек с использованием данных стандартного гидрометеорологического и водохозяйственного мониторинга.
- разработке метода калибровки параметров гидрологической модели по гидрометрическим и гидрохимическим данным с учетом гидрохимического способа идентификации водных масс для смягчения эффекта эквифинальности и повышения идентифицируемости параметров модели при расчетах генетических составляющих речного стока.
- в анализе и сопоставлении результатов расчетов внутригодового хода генетических составляющих речного стока в бассейне Можайского водохранилища, рассчитанных по гидрологической модели и определенных по гидрохимическим измерениям.

Защищаемые положения:

1. Физико-математическая модель формирования стока для бассейна Можайского водохранилища, описывающая с суточным шагом по времени водный режим рек и пространственное распределение характеристик гидрологического цикла речного бассейна (снежного покрова, влажности почвы, испарения, речного стока) по данным стандартного гидрометеорологического и водохозяйственного мониторинга.
2. Метод калибровки параметров модели по гидрометрическим и гидрохимическим данным, позволяющий получить количественные оценки динамики генетических составляющих стока (поверхностный, внутрипочвенный и грунтовый сток) и описать пространственно-временную генетическую структуру речного стока.
3. Результаты проверки модели формирования стока в бассейне Можайского водохранилища по согласованию внутригодового хода генетических составляющих стока, рассчитанных по гидрологической модели и определенных по гидрохимическим измерениям с учетом метода идентификации источников питания водных объектов.
4. Анализ закономерностей внутригодового распределения генетических составляющих стока и выделение преобладающих генетических типов вод в различные фазы водного режима.

Объем и структура работы. Работа состоит из 5 глав, введения и заключения. Объем работы составляет 53 страницы, включая 16 рисунков и 3 таблицы. Библиографический список содержит 32 наименование.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕЧНОГО СТОКА НА ОСНОВЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Существует два основных подхода к разделению гидрографа стока на генетические типы вод на основе гидрохимических исследований. Один из них базируется на применении природных химических трассеров для идентификации водных масс различного происхождения, другой метод расчленения гидрографа построен на использовании химико-статистического анализа состава смеси водных масс по химическим элементам. Оба метода основаны на анализе уравнений баланса воды и массы химических элементов (трассеров) по формулам смешения водных масс.

В первом методе используются природные химические трассеры в рамках модели смешения EMMA (End-Member Mixing Analysis). С помощью такой модели формируются два сложных модельных трассера, каждый из которых представляет собой линейную комбинацию исходных химических трассеров. Основным условием в выборе трассеров для модели является их консервативность, т.е. каждый отдельный химический элемент-трассер не взаимодействует с другими. Помимо этого, концентрации трассеров источника и концентрации в речных водах должны быть хорошо различимы. Состав потенциальных трассеров довольно обширен и сильно зависит от конкретных условий на водосборе. В их числе могут быть макрокомпоненты (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+ и др.), микроэлементы (Sr, Rb), а также стабильные радиоизотопы кислорода и других элементов. Ядром модели является метод главных компонент (МГК или PCA - Principal Components Analysis в зарубежной литературе), который при анализе большого объема разнородных данных существенно понижает размерность изучаемой системы, позволяет выделить латентную структуру данных, а также отделяет содержательную часть от шума, обладает свойством ортогональности [21, 25].

Исследования на основе EMMA-модели достаточно широко распространены за рубежом. Так, например, в работах [26, 32] этот метод применялся на небольших горных водосборах для изучения генетических категорий источников питания речных вод, а также прогноза и регулирования водоснабжения. Объектом исследования является водосбор в пределах горного хребта в южной части Скалистых гор в США. Рассматриваемый бассейн представляет собой полузасушливую горную местность, площадь которого составляет 264 км^2, а среднегодовое количество осадков достигает 840 мм. Исследовались и количественно оценивались три источника: снеговое, дождевое

и грунтовое питание. Модель с четырьмя трассерами показала, что талый тип вод составляет приблизительно половину всего речного стока и является доминирующим источником питания стока. Несмотря на сложную горную местность, характеризующуюся неоднородными геологическими, морфологическими и метеорологическими условиями, авторы смогли определить источники питания и их пространственную изменчивость, в том числе доминирующий источник питания стока.

В России данная методология применялась в рамках экспериментальных исследований на малых бассейнах. В работе [6] объектом исследования является верхняя часть водосбора руч. Ланинского (бассейн оз. Байкал в пределах пролива Малое Море), площадью 10,7 км2. Рассматриваемый район также репрезентативен для горных территорий. Шесть элементов были отобраны в качестве потенциальных трассеров. На основе модели смешения трех источников были получены оценки трех источников питания речного стока ручья. Дождевые воды, доля которых незначительна, воды подземного грунтового горизонта, имеющие тенденцию к преобладанию в меженный период, и так называемые наледные воды, имеющие значительную долю при формировании паводка. В работах [4, 5] определены доли трех источников питания речного стока на территории малых горных водосборах Центрального Сихотэ-Алиня, экспериментального бассейна руч. Еловый. По полученным результатам моделирования авторы пришли к выводу, что количество стабильных генетических компонент может изменяться год от года в зависимости от состояния увлажненности водосбора.

Другим подходом определения генетических составляющих стока гидрохимическим способом является метод П.П. Воронкова [3], представляющий собой развитие графического метода расчленения гидрографа реки по данным наблюдений за внутригодовым изменением различных химических показателей. В рамках этого метода классификация вод проводится по генетическим категориям, каждая из которых определяется химическим составом и свойствами почв и грунтов, через которые происходит стекание вод в русловую сеть. В частности выделяются следующие категории:

1) *Поверхностно-склоновые воды*, формирующиеся на поверхности склонов водосбора при полной влагонасыщенности поверхностного слоя почвы;

2) *Почвенно-поверхностные воды*, формирующиеся в приповерхностном слое почвенного покрова и являющиеся источниками питания микроручейковой сети;

3) *Почвенно-грунтовые воды,* формирующиеся в переувлажненных почвенных слоях одновременно с почвенно-поверхностными водами, образуют временные водоносные горизонты. Достигая этих слоев, вода изменяет направление движения

соответственно гидравлическому уклону и, в случае дренирования слоя эрозионным врезом, поступает в реку;

4) *Грунтовые воды* поступают из постоянно существующих водоносных горизонтов, залегающих на первом от поверхности земли сплошном водоупоре.

На основании данной классификации иногда выделяются также склоновые воды, которые образуются в результате смешения поверхностно-склоновых и почвенно-поверхностных типов вод и обнаруживаются в малых реках.

Главная гипотеза П.П. Воронкова заключается в возможности разработки количественных методов исследования генетической структуры локального стока на основании гидрохимического различия вод вышеприведенных категорий. Различия обусловлены разнообразием процессов, воздействующих на химический состав вод по мере их продвижения к реке. Поверхностные горизонты обогащаются минеральными и органическими компонентами, образующимися в почве в результате жизнедеятельности растительных и животных организмов. Воды, содержащиеся в почвенном горизонте, отличаются большими их концентрациями за счет влияния жизнедеятельности почвенной микрофлоры. Грунтовые воды характеризуются повышенной минерализацией и электропроводностью вследствие длительного контакта с карбонатными и другими хорошо растворимыми минералами.

Таким образом, в каждый момент времени речная вода состоит из смеси вод разного генетического происхождения с характерным химическим составом – склоновым типом вод (СТВ), почвенным (ПТВ) и грунтовым (ГТВ). Количественная оценка каждой генетической составляющей стока зависит от химических показателей в разных регионах, климатических, ландшафтных, морфологических условий территории, а также от особенностей гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов водоемов и водотоков.

Соотношение долей для каждого генетического типа вод может быть рассчитано по формулам смешения трех водных масс:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_t \\ C_1^1 Q_1 + C_2^1 Q_2 + C_3^1 Q_3 = C_t^1 Q_t \\ C_1^2 Q_1 + C_2^2 Q_2 + C_3^2 Q_3 = C_t^2 Q_t \end{cases}, \qquad (1)$$

где Q – расход воды (Q_t – расход воды в реке), C – концентрации трассеров, верхний индекс – номер трассера, нижний индекс – номер источника питания.

Для решения этой системы уравнений необходимо знать концентрации в пробе воды взаимонезависимых химических элементов, а также индексы водных масс, т.е. пары

значений этих характеристик в каждой исходной массе воды (источника) конкретного генетического типа вод, не смешанной с двумя другими. Для получения индексов однородной водной массы необходимо проведение детальных гидрохимических съемок на водосборе с отбором поверхностных, почвенных и грунтовых вод, что является достаточно трудоемкой задачей. Поэтому в работе [18] была предложена методика расчленения гидрографа на генетические составляющие путем использования химико-статистического метода расчета генетического состава смеси водных масс. Уменьшение неопределенности в выборе индексов типов вод достигается путем построения пары треугольников смешения по двум гидрохимическим характеристикам, подобно методу термохалинного анализа морских вод [9], широко применяемого в океанологии. Данный метод основывается на графическом решении задачи определения индексов исходных водных масс путем построения диаграмм смешения вод в координатах температуры и солености. Каждый тип однородной воды с парой характеристик температуры и солености на T,S-диаграмме изображается точкой (рис. 1.1а). При рассмотрении случая смешения трех однородных водных масс и их индексов, если они не лежат на одной прямой, образуют треугольник смешения. Зная положение результирующей T,S-точки в пределах треугольника смешения, можно определить содержание каждой из водных масс в смеси. Для удобства графического определения процентного соотношения каждой из водных масс в смеси строится соответствующая процентная номограмма (рис.1.1б).

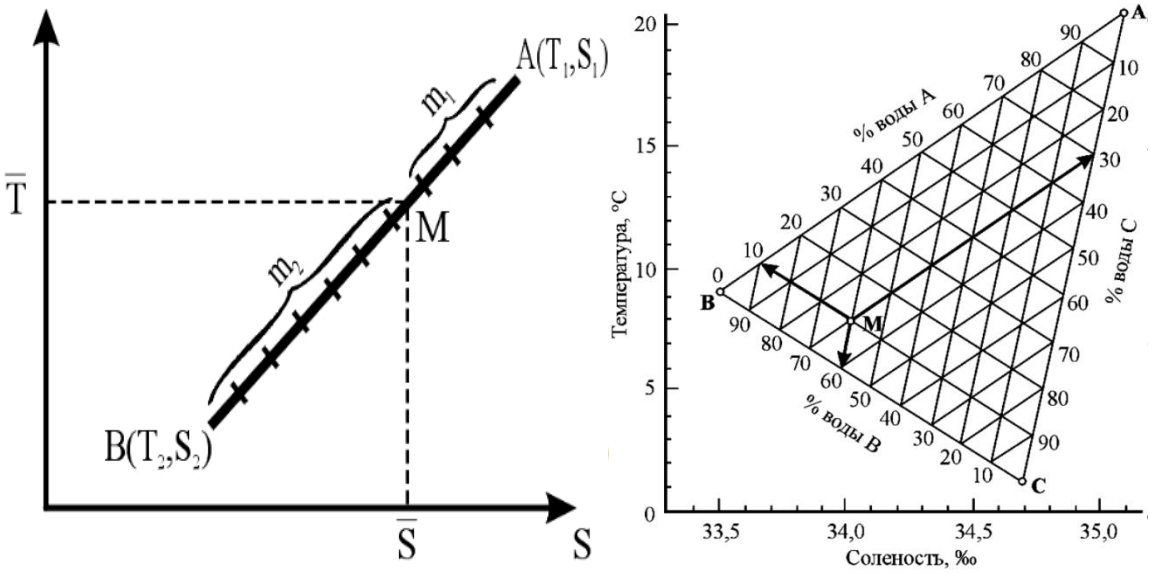

Рис. 1.1. Номограммы смешения для определения процентного соотношения водных масс; а) прямая смешения двух водных масс б) треугольник смешения трех водных масс

При безошибочном определении в пробе пары гидрохимических характеристик, отображающие ее точки в обеих диаграммах, будут находиться в идентичной позиции. Расхождения между позициями этих точек обусловливаются погрешностью расчета генетического состава речной воды. Рассчитанное минимальное среднее расхождение генетического состава проб характеризует среднюю погрешность расчета генетического состава речной воды в реке. Индексы типов вод, принятые для расчета генетического состава речной воды с минимальными расхождениями, можно считать статистически значимыми средними значениями соответствующих характеристик состава воды этих типов в «чистом» виде для исследуемого речного водосбора [18]. Этот гидрохимический метод разделения по типам речных вод использовался в данной работе для калибровки параметров физико-математической модели ECOMAG и моделирования генетических составляющих речного стока на примере бассейна Можайского водохранилища.

2. КРАТКОЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БАССЕЙНА МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Можайское водохранилище создано в 1960 году в верхнем течении р. Москвы, введено в эксплуатацию в 1963 г. Плотина находится у пос. Гидроузел в 383 км от устья р. Москвы и имеет абсолютную отметку 182 м. На р. Москве построены четыре основных водохранилища - Можайское, Рузское, Озернинское и Истринское, из которых Можайское является самым крупным. Москворецкие воды в водохозяйственном балансе столицы составляют около 40%. Площадь бассейна до створа Можайского гидроузла составляет 1360 км^2. Основными притоками реки Москвы являются Лусянка, Колочь и Иночь [15]. Бассейн реки Москвы практически полностью расположен на территории Московской области, лишь малая его часть в пределах Смоленской области. Полный объем водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ), равном 183 м., составляет 235 млн м^3, полезный – 221 млн м^3.Средний годовой сток из водохранилища составляет 267 млн. м^3.

Длина водохранилища более 30 км, ширина – около 3,5 км, максимальная глубина достигает 22,5 м, площадь водной поверхности – 31 км^2. Протяженность береговой линии составляет около 119 км. Гидротехнический комплекс состоит из основного Можайского гидроузла на р. Москве у пос. Марфин Брод, защитного гидроузла на р. Колочь у Старого Села, созданного для предотвращения затопления долины в районе Бородинского поля и защитной дамбы на р. Бодне. В состав Можайского гидроузла входят земляная плотина, водосброс и ГЭС мощностью 2500 кВт.

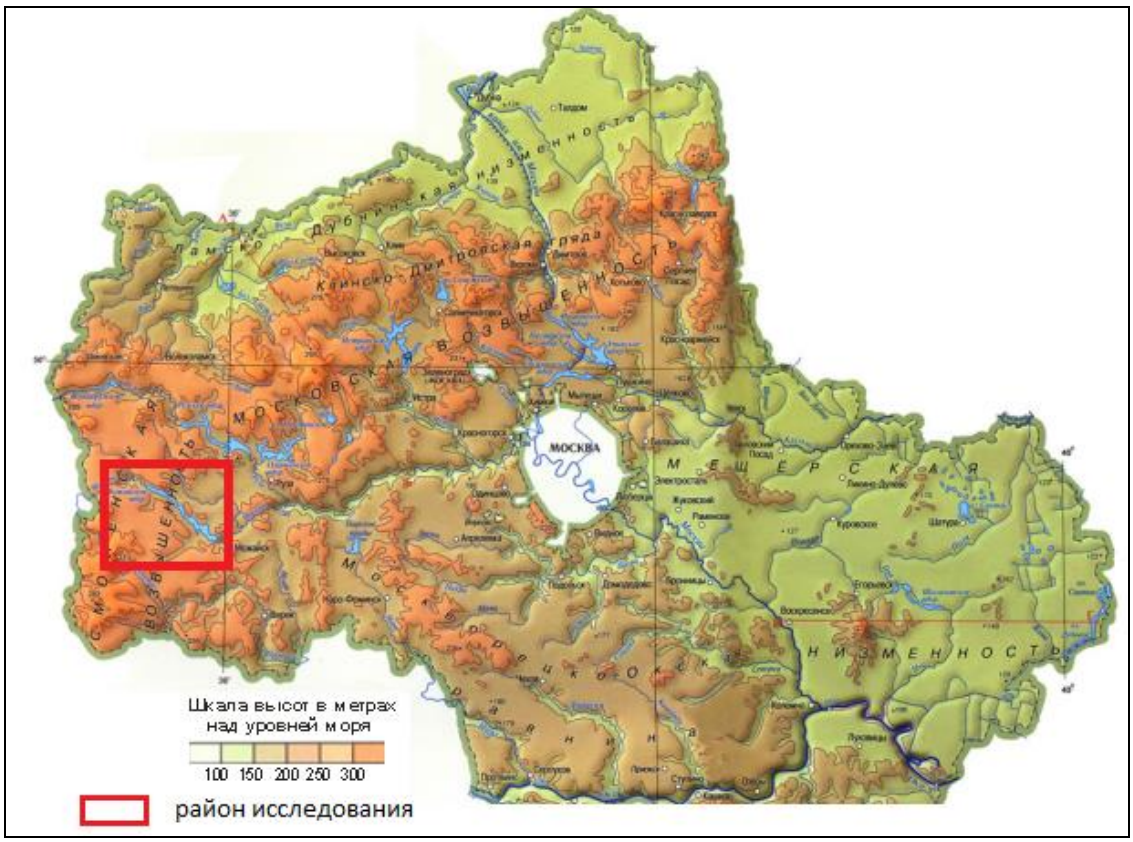

Рис. 2.1 Физико-географическая карта района исследования

Рельеф

Территория бассейна располагается в центральной части Восточно-Европейской равнины в пределах Смоленско-Московской возвышенности с колебанием абсолютных отметок в пределах 153 - 312 м. В целом характерен равнинный рельеф с чередованием низменных равнин и возвышенностей, хорошо выраженными речными долинами рек, балками и оврагами. Восточная часть возвышенности сложена коренными породами, представленными известняками, глинами, мергелями карбона. Также преобладает моренно-эрозионный рельеф, который образовался в результате аккумулятивной деятельности древнего ледника (в четвертичном периоде), отложившего много рыхлого материала, главным образом, неслоистого суглинка с валунами. Этот тип рельефа характеризуется обилием холмов и понижений, разнообразных по величине и очертаниям, причем понижения большей частью заболочены. На территории бассейна встречаются карстовые процессы, которые выражены в различных формах: провальные воронки, котловины, балки, карстовые озера, карстовые западины, ниши и подземные пустоты. Почти на всем протяжении р. Москвы встречается карст и оползневые процессы.

Климат

Климат умеренно-континентальный с резко выраженными сезонами года: умеренно жарким и влажным летом и умеренно холодной зимой с устойчивым снежным покровом. Средняя годовая температура воздуха колеблется от 4,3 до 5,7 °С. Минимальная среднегодовая температура изменяется от 0,1 до 1,8°С, а максимальная в пределах 8,7 – 10,5 °С. Тёплый период (с положительной среднесуточной температурой) длится 205 (север) — 220 (юг) дней. По количеству выпадающих осадков территорию бассейна можно отнести к зоне достаточного увлажнения. Распределение осадков по территории неравномерное. Средняя многолетняя сумма осадков в среднем составляет 650-750 мм. Большая часть их (60-70%) выпадает в теплый период года, с апреля по октябрь с максимумом в июле. Наименьшее количество осадков наблюдается в феврале - апреле. Жидкие осадки составляют 65-75%, твердые 15-25% и смешанные около 10-15% общего количества осадков. Снег обычно выпадает во второй половине ноября и сходит в середине апреля. Продолжительность залегания снежного покров около 140-150 дней. Вегетационный период, то есть с температурой выше +5 °С, продолжается около 180 дней. Средняя мощность снежного покрова 40 – 60 см, достигая максимума в феврале – марте. В суровые и малоснежные зимы наибольшая глубина промерзания в бассейне колеблется от 90 до 160 см, а в теплые - от 20 до 50 см. На испарение в пределах рассматриваемой территории в среднем затрачивается 70-80 % выпадающих атмосферных осадков. Величина испарения увеличивается с северо-востока на юго-запад от 500 до 575 мм. Особенностью климата области являются частые весенние заморозки, а также чередование жаркого сухого и холодного влажного лета, что определяет рискованный характер сельского хозяйства в регионе.

На территории бассейна Можайского водохранилища действует одна метеорологическая станция в г. Можайск.

Почвы

На всей части территории бассейна преобладают дерново-подзолистые почвы различного состава. По механическому составу дерново-подзолистые почвы делятся на тяжелосуглинистые, среднесуглинистые, легкосуглинистые, супесчаные. Тяжелосуглинистые почвы, местами переходящие в глинистые, наиболее распространены в бассейнах реки Колочи. Местами почвы сильно обогащены валунно-галечниковым материалом, которые подстилают средне- и легкосуглинистые почвы [16]. Болотные почвы в виде небольших участках встречаются повсеместно, но редко образуют значительные массивы. Различные сочетания почв расположены, в основном,

по овражно-балочным системам. По механическому составу они относятся к среднесуглинистым.

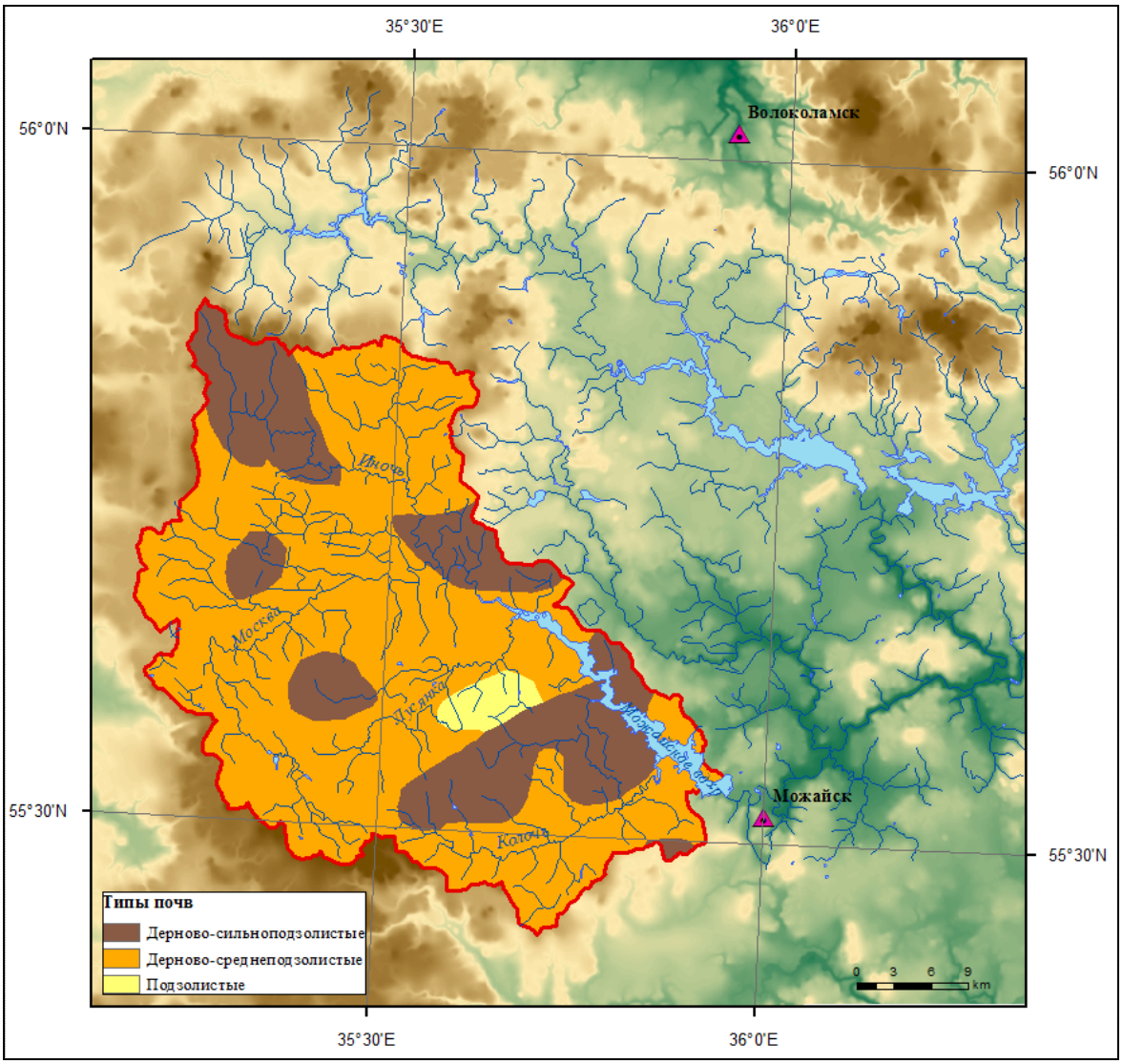

Рис. 2.2 Почвенная карта бассейна Можайского водохранилища

Растительность

Бассейн р. Москвы располагается на границе лесной и лесостепной зон. Большая часть территории находится в подзоне южнотаёжных хвойно-широколиственных лесов. Широколиственные леса приурочены к наиболее возвышенным и хорошо дренированным водораздельным участкам. Преимущественно еловые леса занимают менее возвышенные водоразделы, но также хорошо дренированные реками и оврагами. Сосново-широколиственные леса приурочены к древнеаллювиальным террасам. В пониженных участках рельефа и поймах рек развито луговое разнотравье, а в местах избыточного увлажнения в травостое включены элементы болотной растительности. Болота на территории области распространены неравномерно. На севере района леса

еловые и елово-широколиственные, на юге — в основном берёзовые и осиновые, всего леса занимают 42 % от общей площади бассейна. Луга сенокосы и пастбища вклиниваются в лесные массивы и занимают значительные площади. Наличие лесной растительности играет заметную водорегулирующую роль, увеличивая ресурсы речного стока и естественные ресурсы подземных вод. Большие площади отведены под сельскохозяйственные угодья. К настоящему времени характер леса сильно нарушен хозяйственной деятельностью человека и появилось большое число временных производных насаждений.

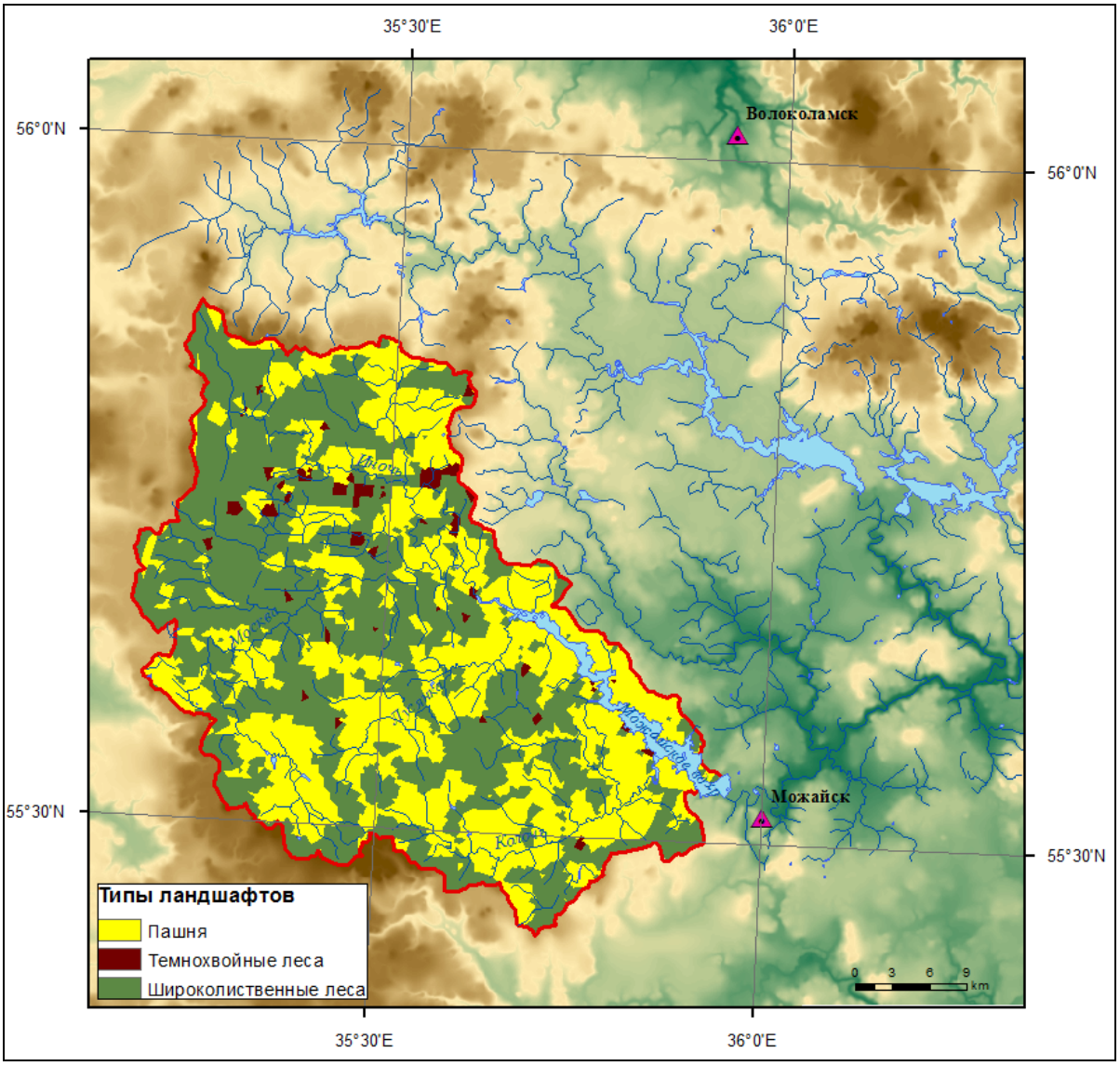

Рис.2.3 Ландшафтная карта бассейна Можайского водохранилища.

Гидрография

Характерной чертой гидрографической сети бассейна является большое количество малых рек.

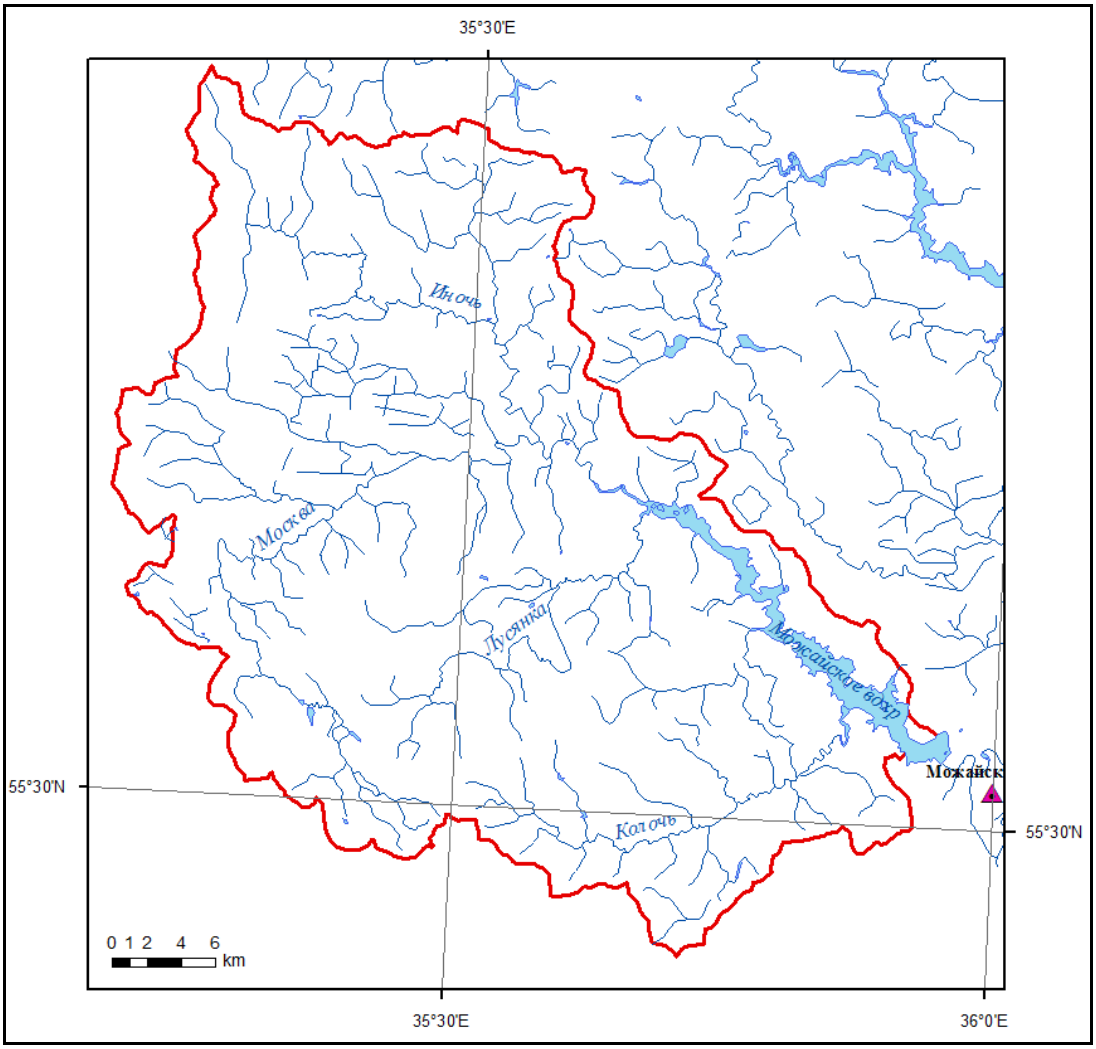

Рис. 2.4 Гидрографическая сеть бассейна Можайского водохранилища

Распределение водных объектов и строение гидрографической сети определяется в основном геолого-геоморфологическим строением и климатическими условиями территории. Особенностью большинства рек является их небольшое падение, обусловленное выровненным рельефом. Реки характеризуются типичными для равнины чертами: относительной симметричностью поперечного профиля долин с широкими поймами в среднем и нижнем течении, спокойным характером течения. В речных долинах распространены мелкие пойменные озера-старицы. Густота речной сети в бассейне реки Москва составляет 0,26 км/км^2, а в бассейне р. Колочи до 0,54 км/км^2.

Гидрологический режим Можайского водохранилища

Можайское водохранилище приурочено к расширению долины р.Москвы, которое прослеживается и несколько ниже него. Русло здесь весьма извилистое. Средний уклон реки 0,4‰ [14, 17]. Водоносность р.Москвы и морфометрические характеристики русла

после Можайского гидроузла практически целиком определяются сбросом воды из водохранилища.

Межгодовая и внутригодовая изменчивость важнейших характеристик водного режима (уровня воды, проточности, составляющих химического баланса и минерализации воды, температуры воды) определяются режимом притока в водохранилище речных вод с водосбора и регулированием стока через Можайский гидроузел.

Внутригодовые колебания уровня воды в Можайском водохранилище достигают 8 м, при этом по проекту возможна сработка до 13 м. Минимальная за год сработка его полезного объема зафиксирована в крайне маловодном 1996-1997 водохозяйственном году - 1,42 м, максимальная в предшествовавшем 1995-1996 г. - 7,62 м, а средняя за весь эксплуатационный период - 4,69 м. В годы с малым половодьем не удается наполнить водой весь полезный объем водохранилища.

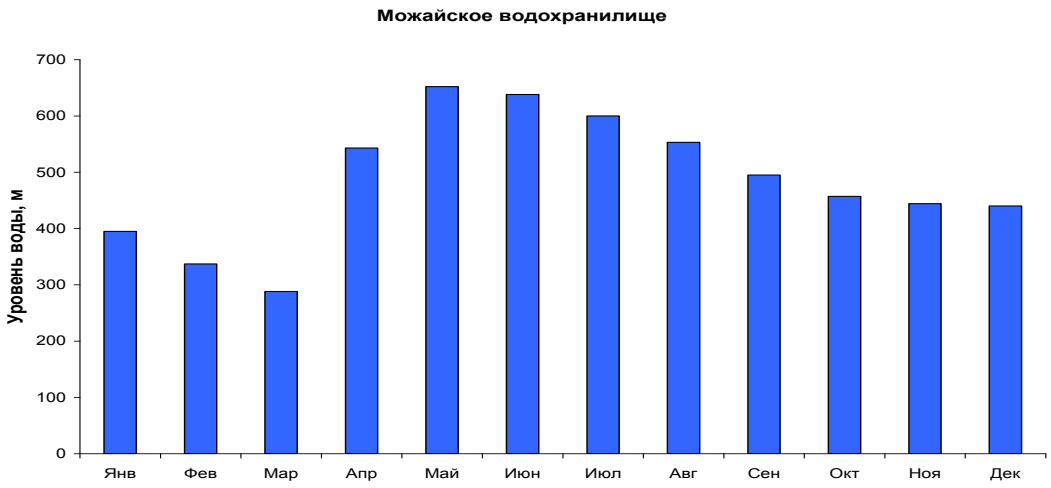

Рис. 2.5 Внутригодовое распределение среднемесячных уровней воды Можайского водохранилища

По классификации М.И. Львовича, р. Москва относится к группе рек с волжским типом водного режима, у которых основным источником питания являются талые снеговые воды. По условиям питания и своему режиму река находится на грани перехода от рек северного района Русской равнины к рекам южного района, у которых годовые минимумы расходов воды приходятся на летнюю межень. В естественных условиях р. Москва относится к типу равнинных рек с преимущественно снеговым питанием. На долю снегового питания приходится до 60%, дождевого – 15-20%,

подземного 20-25%. Подземное питание играет основную роль в формировании меженного стока.

Режим уровней и расходов р. Москвы определяется в целом четко выраженным высоким весенним половодьем, низкой летней меженью, прерываемой дождевыми паводками, и устойчивой продолжительной зимней меженью. Основной объем стока на р. Москве и ее притоках формируется весной, преимущественно в апреле. Однако, в отдельные годы, гидрографы стока могут значительно отличаться от типовых.

Несмотря на частые оттепели, зимние паводки, вызванные таянием снега, проходят не часто. Большей частью к зимним паводкам относятся паводки смешанного происхождения от выпадения дождей и таяния снега, которые наблюдаются обычно в первую половину зимы (ноябре-декабре).

Наивысшие уровни весеннего половодья на р. Москве в среднем наступают в первой декаде апреля. Крайние сроки наступления наивысших уровней наблюдаются соответственно в годы с ранними и поздними датами начала половодья.

Подъем уровня воды во время половодья происходит быстро и интенсивно; продолжительность его составляет в среднем одну треть общей продолжительности половодья. В годы с высокими половодьями интенсивность подъема уровня, как правило, больше, чем в годы с низкими половодьями и достигая 150-210 см/сутки. Спад весеннего половодья происходит менее интенсивно, чем подъем, быстрое падение уровня воды наблюдается только в первые дни после пика, а затем интенсивность спада уменьшается.

В период весеннего половодья полностью или частично затопляются поймы. В зависимости от морфометрических характеристик русла и высоты поймы затопление может происходить ежегодно или только в годы с высоким половодьем. Продолжительность затопления пойм во время весеннего половодья изменяется от нескольких дней до 1 - 1,5 месяцев. В летне-осенний период поймы затопляются исключительно редко.

При всем разнообразии характера колебаний уровней воды в отдельные годы для р. Москвы можно различать два основных типа годового хода уровней. Первый тип, являющийся более простым, характеризуется наличием одной паводковой волны снегового половодья весной, а затем низким и сравнительно устойчивым ходом уровней в течение всей остальной части года. Второй тип является более сложным и разнообразным. Он встречается более часто и характеризуется наличием (помимо пика половодья от талых вод) большего или меньшего числа дождевых паводков, которые в

отдельные годы могут дать подъемы уровня воды на большую высоту, чем в период весеннего половодья.

Летне-осенняя межень почти ежегодно нарушается дождевыми паводками, число и величина которых изменяются и по годам, и по территории. Обычно паводки имеют островершинную форму и характеризуются резким подъемом и спадом уровня.

3. МОДЕЛЬ ECOMAG, ЕЁ СТРУКТУРА И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

3.1 Модель формирования речного стока ECOMAG

В качестве основы для исследования поставленных задач была применена физико-математическая модель ECOMAG, разработанная Ю.Г. Мотовиловым [30].

Модель формирования речного стока ECOMAG описывает основные процессы гидрологического цикла суши в бассейнах рек со смешанным дождевым и снеговым питанием: формирование снежного покрова и снеготаяние, инфильтрацию воды в почву и испарение, термический и водный режим почвы с учетом процессов ее промерзания и оттаивания, формирование поверхностного, внутрипочвенного, грунтового и речного стока.

Модель построена в соответствии со следующей схемой процессов. В летний период выпадающие осадки в виде дождя частично проникают в почву. Избыток воды, не поглощенный почвой, после заполнения депрессий на поверхности бассейна перемещается по уклону поверхности в речную сеть. Часть влаги, впитавшейся в почву, может перемещаться по уклону по временным относительно непроницаемым водоупорам. Вода, не попавшая в речную сеть, расходуется на испарение или дренаж в более глубокие горизонты почвы. В холодный период года рассматриваемая схема дополняется учетом гидротермических процессов в снежном покрове и почве, т.е. формированием снежного покрова и снеготаянием, промерзанием и оттаиванием почвы, инфильтрацией талых вод в мерзлую почву.

При модельной схематизации речного бассейна его поверхность разделяется нерегулярной сеткой на отдельные расчетные элементы (элементарные водосборы) с учетом особенностей рельефа и структуры речной (Рисунок 3.1). Моделирование гидрологических процессов на каждом элементарном водосборе выполняется для четырех уровней: для поверхностного слоя почвы (горизонт А), подстилающего его более глубокого слоя (горизонт В), емкости грунтовых вод и емкости в зоне формирования поверхностного стока. В холодный период добавляется емкость снежного покрова.

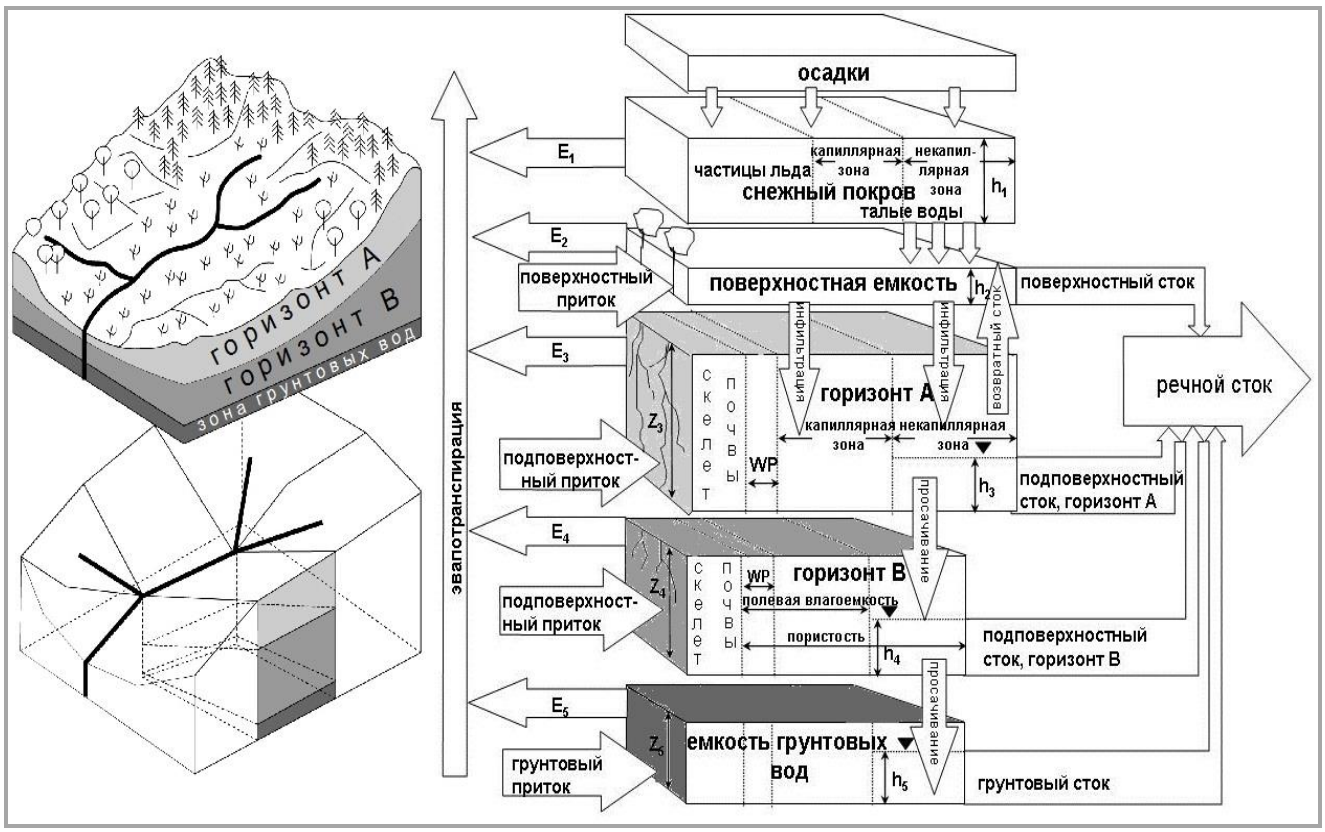

Рисунок 3.1 – Схематизация речного бассейна и структура гидрологической модели для расчетного элемента (элементарного водосбора)

Основные уравнения модели ECOMAG, описывающие процессы гидрологического цикла обыкновенными дифференциальными уравнениями, получены путем интегрирования по пространству соответствующих уравнений в частных производных детальных физико-математических моделей. Такого рода упрощенные физически обоснованные модели в иерархии типов гидрологических моделей занимают промежуточное место между пространственно-распределенными физико-математическими моделями и пространственно-распределенными емкостными концептуальными моделями. Такие модели сохраняют основные черты и преимущества физико-математических моделей (например, физическую обоснованность параметров, т.е. возможность их задания по измеряемым характеристикам бассейна). В то же время упрощенные физически обоснованные модели часто оказываются более эффективными при решении прикладных задач, так как они менее требовательны к составу и полноте исходной информации, а также менее чувствительны к ошибкам в задании этой информации. Ниже дано описание основных гидрологических процессов в модели ECOMAG по работе [30]. В течение теплого периода года для описания процессов используются следующие алгоритмы.

Горизонт почвы А (индекс 1). Предполагается, что пространственная функция распределения (F) вертикальной гидравлической проводимости насыщенной почвы (K) для каждого элемента речного бассейна описывается экспоненциальной функцией распределения вероятности

$$F(K) = 1 - \exp(-\alpha K), \quad \alpha = \frac{1}{K_m}, \tag{3.1.1}$$

где K_m – среднее значение K на элементе.

Если предположить, что для каждой точки области имеют место следующие соотношения между интенсивностью осадков R и инфильтрацией V: $V=K$, при $R \geq K$ и $V=R$, при $R<K$, то для всего элемента площади средняя интенсивность инфильтрации в почву (V_1) равна

$$V_1 = \int_0^R \exp(-\alpha K) dK = K_m [1 - \exp(-R / K_m)], \tag{3.1.2}$$

Суммарная пористость P в горизонте почвы разделяется на две части: капиллярную зону (верхний предел влажности почвы – полевая влагоемкость, FC) и некапилляру зону (разность, D, между P и FC). Разделение впитавшейся влаги между зонами для каждого ландшафтного элемента производится с учетом пространственной функции распределения полевой влагоемкости, которая описана показательной функцией

$$F(FC) = \left(\frac{FC}{FCM} \right)^{\beta}, \tag{3.1.3}$$

где FCM – максимальное значение FC на ландшафтном элементе, β – параметр функции распределения. Среднее значение FC на элементе (FC_m) равно $FC_m = FCM \dfrac{\beta}{\beta + 1}$.

С учетом (2.1.3) инфильтрация впитавшейся воды в капиллярную зону равна

$$V_{1,c} = V_l [1 - (W_l / FCM)^{\beta}], \tag{3.1.4}$$

а просачивание в некапиллярную зону

$$V_{1,nc} = V_l (W_l / FCM)^{\beta}, \tag{3.1.5}$$

где W_l – объемная влажность почвы.

Капиллярная зона. Водный режим капиллярной зоны почвы в горизонте А рассчитывается с использованием следующего уравнения

$$Z_l \frac{dW_l}{dt} = V_{1,c} - E_1, \tag{3.1.6}$$

где Z_1 – глубина горизонта А, E_1 – интенсивность эвапотранспирации, которая рассчитывается как:

$$E = \begin{cases} k_e d, & \text{при } W > W_e, \\ k_e d(W - W_e), & \text{при } W < W_e, \end{cases} \qquad (3.1.7)$$

где $W_e=(FC+WP)/2$, WP – влажность завядания, d – дефицит влажности воздуха, k_e – эмпирический коэффициент.

Некапиллярная зона. Предполагается, что вода, которая поступает в некапиллярную зону, может проникать в горизонт В с интенсивностью V_2, равной насыщенной гидравлической проводимости почвы K_2в горизонте В. Если $V_{1,nc}>K_2$, то впитавшаяся вода может накапливаться в некапиллярной зоне и перемещаться в направлении преобладающего уклона i по относительно водонепроницаемой поверхности между горизонтами А и В. В период ливневых осадков некапиллярная зона горизонта А может полностью заполниться, и тогда на этой области будет формироваться возвратный поверхностный сток. Предполагается, что подповерхностный сток может быть описан законом Дарси. Для описания режима влаги в некапиллярной зоне используется следующее уравнение

$$\frac{D_l}{2}\frac{d}{dt}(b_L h_{l,L} + b_0 h_{l,0}) = (V_{1,nc} - R_r - V_2)b_m - (Q_{l,L} - Q_{l,0})/L\,, \qquad (3.1.8)$$

где K_x – гидравлическая проводимость насыщенной почвы в горизонтальном направлении, h_l– уровень воды в некапиллярной зоне, b и L – ширина и длина ландшафтного элемента в плане, b_m – средняя ширина элемента, Q_l – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс L) подповерхностных вод для ландшафтного элемента, R_r – интенсивность притока возвратных вод на поверхность, который формируется из-за избытка подповерхностного потока (bK_xih) над максимальной фильтрационной способностью горизонта (bK_xiZ), $Q_l = bK_{x,l}ih_l$, $D_l = P_l - FC_1$, $V_2 = K_2$, $b_m = \frac{b_L + b_0}{2}$.

Индексами 0 и L обозначаются величины на верхней и нижней границах планового ландшафтного элемента.

Горизонт почвы В (индекс 2). Режим влажности почвы в горизонте В описан уравнением

$$Z_2\frac{dW_2}{dt} = V_2 - V_3\,, \qquad (3.1.9)$$

гдеV_3 – интенсивность просачивания почвенной влаги из горизонта В в зону грунтовых вод, равная $V_3 = K_2\left(\frac{W_2 - WP}{P_2 - WP}\right)^4$.

Зона грунтовых вод (индекс 3). Поток грунтовых вод рассчитывается по уравнению

$$D_3 \frac{d}{dt}(b_L h_{3,L} + b_0 h_{3,0}) = (V_3 + V_G) b_m - (Q_{3,L} - Q_{3,0}) / L, \qquad (3.1.10)$$

где h_3 – уровень грунтовых вод, Q_3 – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс L) грунтовых вод для ландшафтного элемента, равный $Q_3 = bK_{x,3} i h_3$, V_G – интенсивность водообмена между верхним горизонтом грунтовых вод и более глубокими слоями.

Поверхностный сток (индекс 4). Движение поверхностных вод по склонам описано интегральным уравнением кинематической волны:

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}(b_L h_{4,L} + b_0 h_{4,0}) = R_0 b_m - (Q_{4,L} - Q_{4,0}) / L, \qquad (3.1.11)$$

где h_4 – глубина поверхностного потока, Q_4 – боковой приток (индекс 0) и отток (индекс L) поверхностных вод для ландшафтного элемента, равный $Q_4 = i^{1/2} h_4^{5/3} b / n$, n – коэффициент шероховатости Маннинга, $R_0 = R - V_l + R_r$.

В течение холодного периода года для описания процессов используются следующие алгоритмы.

Формирование снежного покрова и снеготаяние (индекс 5). Характеристики снежного покрова подвергаются временным изменениям вследствие вновь выпадающих осадков, испарения снега и его таяния, замерзания талой воды в снеге и его уплотнения. Предполагается, что фазовый состав выпадающих осадков R определяется среднесуточной температурой воздуха T: при $T<T_{cr}$ выпадает только снег R_s, при $T>T_{cr}$ – только дождь R_w. Значение T_{cr} может быть принято из метеорологических данных или подобрано в процессе калибровки параметров модели. Интенсивность снеготаяния S_T рассчитывается с помощью коэффициента стаивания и температуры воздуха. Та же процедура используется для описания замерзания талых вод в снеге S_f. Испарение твердой E_s и жидкой E_w фаз снега рассчитывается с использованием данных по температуре воздуха и дефициту влажности водяного пара. Скорость уплотнения снега v_s описана эмпирическим уравнением Иосиды [Кучмент и др., 1983].

Для описания формирования снежного покрова и снеготаяния используется следующая система уравнений

$$\frac{\rho_i}{\rho_w}\frac{d}{dt}(I\, h_5) = R_s - E_s - S_T + S_f \ , \qquad (3.1.12)$$

$$\frac{d}{dt}(W_5 h_5) = R_w + S_T - E_w - V_5 - S_f \ , \qquad (3.1.13)$$

$$\frac{dh_5}{dt} = \rho_w \left[\frac{R_s}{\rho_n} - \frac{S_T + E_S}{\rho_i I} \right] - \mathrm{v}_s(h_5, I, W_5)\,, \qquad (3.1.14)$$

где I и W_5 – объемное содержание льда и воды в снеге, r_i и r_w – удельный вес льда и воды, r_n – плотность нового снега, h_5 – глубина снежного покрова, V_5 – водоотдача снежного покрова, которая рассчитывается, принимая во внимание процесс задержания талых вод в снеге под действием капиллярно-сорбционных сил.

Тепловой режим снега и почвы. Предполагается, что вертикальные температурные профили в снеге, мерзлой и талой почве могут быть заданы линейными функциями глубины, а миграцией влаги к фронту промерзания со стороны талой зоны почвы можно пренебречь. При этих условиях уравнение Стефана, описывающее динамику глубины промерзания H_f и глубины оттаивания почвы H_T , имеет аналитическое решение, и величины H_f и H_T рассчитываются из следующих выражений:

$$Q_f \frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda_T T_g}{H_g - H_f}\,, \qquad (3.1.15)$$

$$H_T = \left(H_f^{\,2} + \frac{2\lambda_T T}{Q_f} \delta t \right)^{0,5}\,, \qquad (3.1.16)$$

гдеH_g – глубина уровня грунтовых вод с температурой T_g, λ_s, λ_f, λ_T – коэффициенты теплопроводности снега, мерзлой и талой почвы соответственно, T_0 – температура на границе «почва–снег», равная $T_0 = \dfrac{\lambda_S T H_f}{\lambda_S H_f + \lambda_f h_5}$, $Q_f = \rho_w L_f (W - W_u)$ – количество тепла, выделяемое на фронте промерзания (или поглощаемое на фронте оттаивания), L_i – скрытая теплота плавления льда, W_u – содержание незамерзшей влаги в почве при 0ºС.

Инфильтрация в мерзлую почву. Инфильтрация талых и дождевых вод в мерзлую почву описана следующим уравнением

$$V_l = K_f \left[1 - \exp\left(V_5 / K_f \right) \right], \qquad (3.1.17)$$

гдеK_f – гидравлическая проводимость насыщенной мерзлой почвы, равная $K_f = K_l \left(\dfrac{P_l - \bar{I} - WP}{P_l - WP} \right)^4 / (1 + k_i \vec{I})^2$, $\bar{I} = \dfrac{\rho_w}{\rho_i} \dfrac{H_f - H_T}{Z_1} (W_1 - W_u)$ – средняя льдистость промерзшего слоя почвы, k_i – эмпирический параметр, равный 8.

Речной сток (индекс 6). Боковой приток к элементу речной сети рассчитывается как

$$Q_{lat} = Q_{1,n} + Q_{3,n} + Q_{4,n}, \quad (3.1.18)$$

где индекс n обозначает боковой приток в элемент речной сети от соседних к этому элементу левого и правого склонов водосборной площади.

Речной сток на элементе речной сети описан упрощенной версией уравнения кинематической волны

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}(b_{6,L}h_{6,L} + b_{6,0}h_{6,0}) = (Q_{lat} + Q_{6,0} - Q_{6,L}) / L_6, \quad (3.1.19)$$

гдеh_6 – глубина речного потока, b_6 и L_6 – ширина и длина элемента реки в плане, Q_6 – расход воды, равный $Q_6 = i_6^{1/2} h_6^{5/3} b_6 / n_6$, n_6 – коэффициент шероховатости Маннинга, i_6 – уклон реки, (индексы 0 и L обозначают величины на входе и выходе расчетного участка речной сети).

Многолетний опыт моделирования речных систем показал, что на неподпорных участках сложных речных систем расчеты по гидродинамическим уравнениям Сен-Венана и по модели кинематической волны дают близкие результаты расчета расходов воды в русле [7].

Учет озер в модели организован в виде линейной емкости по следующим уравнениям:

$$\frac{dW}{dt} = (Q_{пр} \pm Q_{лед} - k_1 W), \quad (3.1.20)$$

$$Q_{лед} = k_2 \sum T^{-}, \quad (3.1.21)$$

где $Q_{пр}$ – приток воды к озеру, k_1 – константа емкости истечения, W – объем воды в озере,

k_2 – коэффициент на льдообразование, $\sum T^{-}$ – сумма отрицательных температур воздуха.

3.2 ИМК ECOMAG

Для эффективного решения гидрологических задач моделирования формирования стока в речных бассейнах на базе модели ECOMAG был разработан информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG, который интегрирует расчетный модуль – программную реализацию математической модели ECOMAG, специализированную географическую информационную систему (ГИС) ECOMAG–extension для схематизации речных бассейнов, базы данных для информационного обеспечения расчетного модуля, а также управляющую оболочку, включающую средства управления картографической информацией, базами данных и расчетным модулем, которые

позволяют сконфигурировать необходимые варианты расчетов и визуализировать их результаты в форме графиков и карт пространственного распределения расчетных гидрологических характеристик (в том числе распределение расходов воды в русловой сети бассейна). Общая структура ИМК ECOMAG приведена на рисунке 3.2.

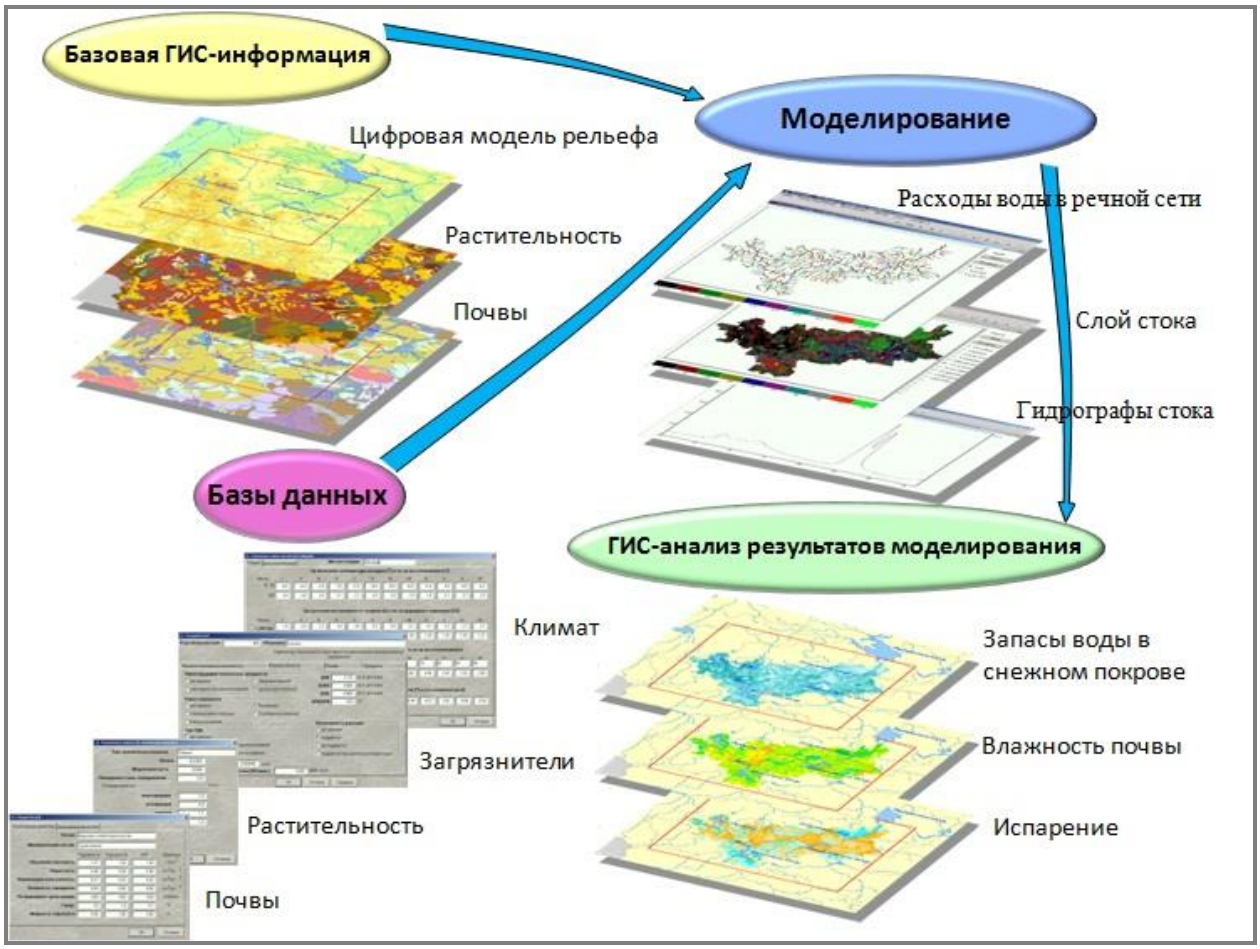

Рис. 3.2. Структура ИМК ECOMAG

ИМК ECOMAG предназначен для широкого круга гидрологических и природоохранных прикладных задач диагностики и прогнозирования. С 2004 г. комплекс задействован Федеральным агентством водных ресурсов для моделирования и сценарных расчетов гидрологических характеристик в бассейне Волги для задач расчетов бокового притока к водохранилищам Волжско-Камского каскада [13]. Примеры применения модели для описания формирования речного стока на водосборах разного размера (от десятков до миллионов квадратных километров), расположенных в разных природных условиях, приведены в работах [11, 12, 23, 29, 30].

3.3 Пространственная схематизация водосбора.

Для моделирования процессов поступления и стекания воды по склонам водосбора и в русловой сети, необходимо провести схематизацию бассейна и речной сети, информация о древообразной структуре которых закладывается в модель (какая река впадает в какую, протяженность притока, прилегающие склоны, с которых вода попадает на данный участок реки, типы почв и землепользования на этих участках и т.д.). В программном комплексе ECOMAG реализована схема автоматического деления водосбора по строению речной сети на основе цифровой модели рельефа с учетом факторов подстилающей поверхности и зарегулированности стока с помощью ГИС-технологий. Такая схема позволяет быстро адаптировать модель к любому по площади водосбору, ускоряет процесс подготовки данных для моделирования, значительно расширяет возможности программного комплекса и круг решаемых им задач.

Для автоматизации процесса подготовки модельной схематизации речного бассейна автором программного комплекса дополнительно разработан блок **Ecomag Extension** на основе геоинформационной системы ArcView, предназначенный для решения задач пространственного моделирования и анализа водных потоков и поверхностей. Основными объектами, с которыми он работает, являются грид-темы – растровый формат записи пространственной информации в виде регулярной сетки или матрицы, организованной как набор строк и столбцов. Исходной информацией для моделирования сети водотоков и элементарных речных бассейнов является грид поверхности рельефа (ЦМР).

ЦМР является хорошей альтернативой полевых исследований и ручной обработки топографических карт. Такие особенности как уклон, густота речной сети, длина русла, площадь водосбора и др. могут быть надежно определены для разных по площади водосборов.

С помощью модуля в программе ArcView моделируется речная сеть по выбранной ЦМР. Детализация речной сети задается пороговым значением, которое определяет накопление стока в каждой ячейке. Например, при пороговом значении 100 всем ячейкам, имеющим более 100 “впадающих” в них ячеек, присваивается значение 1 (речное русло), остальным - значение NoData. Для идентификации смоделированной речной сети используется реальная речная сеть, как электронный слой векторной ГИС. При несовпадении реальной и вычисленной речных сетей, пороговое число можно увеличить или уменьшить, чтобы добиться максимального соответствия по густоте и детализации сетей.

Грубое разрешение исходной цифровой модели рельефа может служить причиной несовпадения реальной и модельной речных сетей, особенно в тех местах, где рельеф выражен слабо (плоский рельеф). Для наиболее точного приближения вычисленной речной сети к реальной, реализован механизм корректировки рельефа рабочего грида поверхности. Этот механизм включает в себя изменение значений высот отдельных ячеек рельефа рабочего грида, с последующим пересчетом гридов направления и накопления стоков в ячейках, и перестроение модельной речной сети.

Заключительным этапом моделирования речной сети является присвоение числового порядка сегментам грида, представляющего ветви растровой линейной русловой сети. В подмодели гидрологического цикла при расчетах используется следующий метод присвоения порядка водотокам: главная река является рекой первого порядка, ее притоки являются реками второго порядка, их притоки – реками третьего порядка и так далее. Описанный порядок удобен для реализации модели кинематической волны (сначала идет расчет по водотокам высшего порядка, затем, при расчете по следующему порядку эта информация учитывается как боковой приток и так далее, пока не будет произведен расчет стекания воды по главной реке).

После построения модельной речной сети и ее проверки, необходимо очертить бассейн, для которого будет производиться расчет. С помощью расчетного модуля Ecomag Extension по гриду поверхности выделяется необходимый бассейн до замыкающего створа и разбивается на элементарные водосборы, которые строятся для каждого сегмента модельной речной сети. Элементарные водосборы представляют собой области аккумуляции стока между узлами речной сети и являются расчетными элементами модели.

Всем элементарным водосборам передается информация о типах почв и ландшафтов, которая считывается с соответствующих карт в программном комплексе ArcView, а необходимые для расчетов характеристики почв и ландшафтов автоматически выбираются из баз данных «Почва» и «Землепользование», и в дальнейшем усредняются с учетом весовых коэффициентов по занимаемой ими площади. После этого начинается этап проведения расчетов.

3.4 Базы данных: информационное обеспечение комплекса.

Базы данных ИМК ECOMAG содержат информацию о речных бассейнах, параметрах типов почв и ландшафтов, метеорологических, гидрологических и водохозяйственных характеристиках.

В качестве основных видов картографической информации для формирования баз данных о характеристиках речных бассейнов используются следующие материалы: цифровые топографические карты различных масштабов на рассматриваемую территорию; цифровые модели рельефа различного пространственного разрешения; серии тематических карт (водных ресурсов, почвенная, ландшафтная и т.д.); карты-схемы пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды.

Базы данных характеристик речных бассейнов, метеорологических, гидрологических и водохозяйственных блоков информации содержат, главным образом, описание объектов, длительность периодов гидрометеорологического и водохозяйственного мониторинга объектов, а также пути доступа к загрузочной информации об объектах (структуре модельной речной сети и элементарных водосборов, пространственном распределении типов почв и растительности в речном бассейне, сети станций мониторинга и т.д.) и электронным архивам рядов данных наблюдений при расчетах соответствующих речных бассейнов.

Информационное гидрометеорологическое обеспечение – одна из основ для проведения расчетов с помощью ИМК ECOMAG. Основными метеорологическими характеристиками необходимыми для расчета по модели являются среднесуточные осадки, температура воздуха и дефицит влажности. Гидрологическая информация содержит в себе данные о среднесуточных расходах воды на постах, о суточном притоке воды к водохранилищам и служит для проверки результатов моделирования стока воды. Также в гидрологическую информацию входят данные о суточных сбросах воды с водохранилищ, необходимые для задания начальных условий на зарегулированных водосборах. Кроме выше перечисленного, для более точной верификации модели ECOMAG, могут использоваться ежедекадные данные наблюдений за снежным покровом.

В программный комплекс входят также встроенные базы данных **«Почва»** и **«Землепользование»**, которые содержат информацию о характеристиках типов почв и ландшафтов. В базе данных **«Почва»** собраны характеристики для 112 типов почв, являющиеся параметрами модели ECOMAG: механический состав, объемная плотность, пористость, наименьшая полевая влагоемкость, влажность завядания, коэффициент фильтрации, содержание гумуса, а также гидрохимические характеристики. В базе данных **«Землепользование»** содержатся параметры модели, меняющиеся в зависимости от вида ландшафта (пашня, целина, лес и т.п.): шероховатость, поверхностное задержание, коэффициент впитывания, эмпирический коэффициент в формуле испарения, коэффициент таяния и глубина промерзания.

4. АДАПТАЦИЯ ИМК ECOMAG ДЛЯ БАССЕЙНА МОЖАЙСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Методика построения физико-математических моделей формирования стока в конкретных речных бассейнах с использованием ИМК ECOMAG включает в себя проведение следующих этапов:

1. Краткая физико-географическая характеристика региона с использованием водно-кадастровых, справочных и других литературных источников.
2. Сбор и описание состава, структуры и объема использованных картографических материалов на территорию бассейна, а также гидрометеорологического и водохозяйственного обеспечения.
3. Модельная пространственная схематизация речного бассейна и русловой сети с использованием программного комплекса Ecomag Extension.
4. Калибровка модельных параметров и валидация модели путем сравнения рассчитанных и фактических данных по стоку (суточные гидрографы, месячные, квартальные и годовые объемы стока) в пунктах наблюдений, а при наличии пространственной информации – сравнение полей этих характеристик.
5. Проведение численных экспериментов.
6. Анализ и обсуждение результатов.

Физико-географическая характеристика бассейна Можайского водохранилища дана в первой главе данной работы.

4.1 Состав и структура информационного обеспечения модели

Картографическая информация. Для модельной схематизации водосборной площади и речной сети в бассейне Можайского водохранилища использовалась цифровая модель рельефа с разрешением 100x100 м, полученная на основе топографических карт масштаба 1: 50 000 [1]. С использованием модуля ***Ecomag Extension*** на водосборе было выделено 95 расчетных элементарных бассейнов, их средняя площадь составляет около 14.3 км^2, модельная речная сеть кроме основной реки включает 19 притоков 1-го порядка, 23 притока 2-го порядка, 5 – 3-го.

Параметры модели назначались с учетом почвенной и ландшафтной карт масштаба 1: 500 000 и 1: 200 000 соответственно [1]. В бассейне Можайского водохранилища были выделены три типа почв (подзолистая, дерново-среднеподзолистая, дерново-сильноподзолистая) и три вида ландшафтов (пашня,

широколиственный лес, темнохвойный лес). На исследуемой территории преобладает дерново-среднеподзолистый тип почв и широколиственный лес (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Соотношение типов почв и ландшафтов в бассейне Можайского водохранилища

Тип почв/ландшафтов	**Доля от общей площади водосбора,%**
Дерново-сильноподзолистый	27
Дерново-среднеподзолистый	71
Подзолистый	2
Широколиственный лес	53
Темнохвойный лес	2
Пашня	45

Гидрометеорологическая информация. Для задания граничных условий модели использовались многолетние ряды суточных сумм осадков, среднесуточных значений температуры и влажности воздуха, которые задавались по данным наблюдений на 10 метеостанциях (рис. 4.1), расположенных в непосредственной близости от исследуемого объекта. Интерполяция метеорологических характеристик для каждого элементарного водосбора в модели была организована по данным ближайших к нему 5 метеостанций с весовыми коэффициентами.

Для калибровки параметров и валидации модели использовались данные наблюдений о расходах воды на гидрометрических постах Барсуки (р. Москва), Черники (р. Лусянка), Колочь (р. Колочь) и общем притоке воды к Можайскому водохранилищу (пос. Гидроузел) (табл. 4.2). Однако поскольку р. Колочь зарегулирована, и на ней была построена земляная плотина с бетонным водосбросом и насосной станцией с целью предотвращения затопления водами водохранилища, внутригодовое распределение стока претерпело изменения, и г/п Колочь в дальнейших результатах приводится не будет. Период наблюдений на гидрометрических постах и на Можайском водохранилище составлял 34 лет с 1982 по 2015 гг.

Таблица 4.2 Гидрометрические посты, по которым проводилась калибровка модели формирования стока

Название поста	**Период наблюдений**	**Площадь водосбора, км^2**	**Длина до впадения в водохранилище, км**
Барсуки (р. Москва)	1960 – 2015 гг.	755	62
Черники (р. Лусянка)	1960 – 2015 гг.	174	37
Колочь (р. Колочь)	1961 – 2015 гг.	279	36
Можайское вдхр - п. Гидроузел.	1982 – 2009 гг.	1360	-

Гидрохимическая информация. Для расчетов использовались гидрохимические данные в створе р. Москва – д. Барсуки. Для анализа были выбраны шесть взаимонезависимых показателей химического состава воды: удельная электропроводность (мкСм/см), характеризующая минерализацию воды; концентрация ионов Na^+ и K^+ (мг/л); валового фосфора (мг/л); величины ПО и БО воды (мг 0/л) [18]. Повышенные значения первых двух характеристик свидетельствуют о преобладании грунтового типа вод в речной воде, а остальных четырех характеристик – почвенного и склонового типов вод. Данные по рассматриваемым химическим характеристикам были собраны за период с июля 1983 г. по апрель 2013. Особый интерес представляют детальные съемки по, так называемой, «балансовой программе», проводимой на полигоне базы МГУ Красновидово, во время которой в период с 15 ноября 1983 г. по 12 декабря 1984 г. в створе р. Москва – д. Барсуки было отобрано 109 проб воды с ежедневной периодичностью в половодье и 1-2 раза в неделю в остальную часть года. Аналогичная «балансовая программа» была проведена в 2012 году с менее детальными наблюдениями. Было отобрано 35 проб притоков с наблюдениями: раз в 2–4 дня в период половодья, в остальную часть года – в среднем раз в 2 недели (в летне-осенний период – каждые 1–2 недели, зимой – каждые 2–3 недели).

После анализа и схематизации всех полученных данных были построены 12 возможных сочетаний пар диаграмм смешения ($\varkappa$, БО и Na, ПО; $\varkappa$, БО и Na, К; $\varkappa$, БО и Na, Р; $\varkappa$, ПО и Na, БО; $\varkappa$, ПО и Na, К; $\varkappa$, ПО и Na, Р; $\varkappa$, К и Na, БО; $\varkappa$, К и Na, ПО; $\varkappa$, К и Na, Р; $\varkappa$, Р и Na, БО; $\varkappa$, Р и Na, ПО; $\varkappa$, Р и Na, К). Оба показателя грунтовых вод использованы во всех сочетаниях, а четыре показателя почвенно-поверхностного стока – в шести сочетаниях. Пример диаграмм смешения (треугольников) для сочетания рядов электропроводимости и БО, Na и ПО приведен на рис. 4.2. На основании построенных диаграмм по формулам смешения трех водных масс был проведен сравнительный анализ полученных процентных соотношений для каждого генетического типа вод.

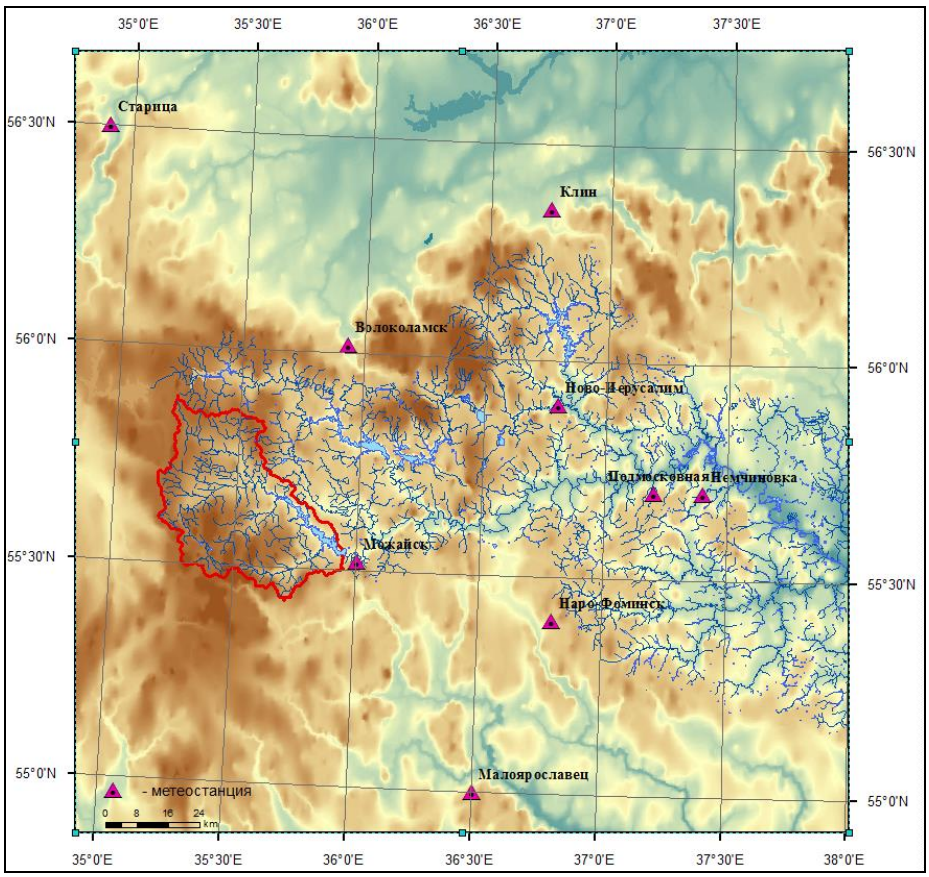

Рис.4.1 Расположение метеорологических станций на исследуемой территории

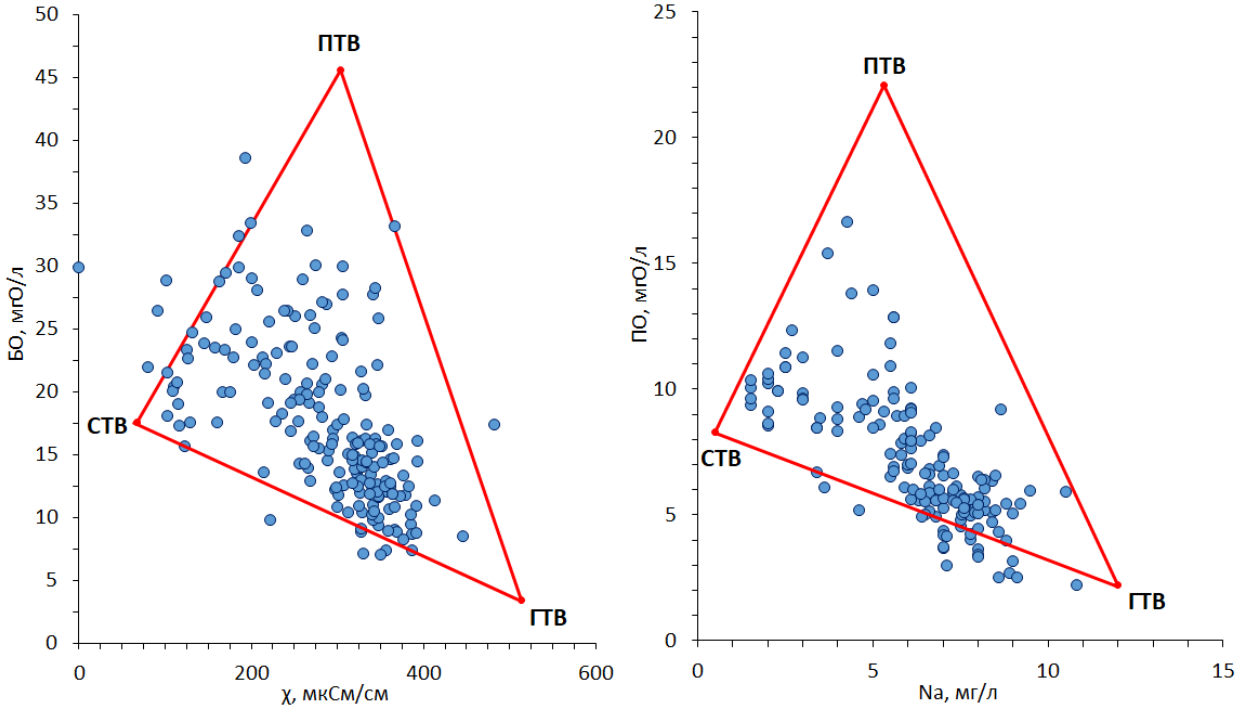

Рис. 4.2. Диаграммы смешения типов вод в створе р. Москва – д. Барсуки для периода 1983 – 2013 гг. (слева), для периода 1983 – 2007 гг. (справа).

4.2 Калибровка модельных параметров и валидация модели

Калибровка параметров модели ECOMAG проводилась по суточным гидрографам стока на 3-х гидропостах за период 1982-1992 гг., валидация осуществлялась для периода 1993-2015 гг. Кроме того, для калибровки привлекались данные по процентному соотношению генетических типов вод, полученные на основе анализа гидрохимических наблюдений в створе р. Москва – д. Барсуки [18].

Для уменьшения погрешностей результатов моделирования разнородных данных рекомендуется проводить многоцелевую калибровку параметров (например, [27]). Стратегия заключается в использовании средневзвешенного показателя эффективности при объединении нескольких показателей в одну цель, например, при калибровке параметров по гидрографам стока в нескольких створах одновременно. Либо, в других вариантах, когда привлекаются совершенно разнородные данные (например, расходы воды и гидрохимические данные), калибровка осуществляется путем поиска компромиссного решения, доставляющего максимальную эффективность расчетов для каждого из показателей.

Бóльшая часть параметров модели задавалась из баз данных ИМК ECOMAG характеристик почв, растительности и речных бассейнов. Несколько ключевых параметров (испарение, инфильтрация зоны грунтовых вод, толщина поверхностного слоя почвы (горизонт А), снеготаяние, критическая температура определения фазы атмосферных осадков, критическая температура таяния снежного покрова) подбирались путем калибровки модели по отклонениям рассчитанных гидрографов стока от фактических. В качестве целевой функции за основу был принят распространенный в гидрологических расчетах критерий Нэша–Сатклифа [31] (NS):

$$\mathrm{NS} = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}, \quad (4.1)$$

где $F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{\text{ср}})^2$, $F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$, $Q_{i,p}$ – рассчитанный по модели расход воды в i–е сутки, Q_i – фактический расход, $Q_{\text{ср}}$ – средняя величина фактического расхода воды за период расчета. Чем ближе NS к единице, тем выше точность моделирования. Значения NS<0.35 означают, что модель неэффективна, при $NS > 0.75$ соответствие гидрографов можно считать хорошим [31].

При гидрологических расчетах по модели ECOMAG на каждом временном шаге выполняется моделирование характеристик стока во всех ячейках речной сети, поэтому в рамках одного расчета имеется возможность сопоставления рассчитанных и измеренных гидрографов стока во всех точках модельной речной сети, соответствующих

пунктам расположения мониторинговой гидрометрической сети. Критерий (4.1) показывает степень соответствия рассчитанных и фактических гидрографов для одной мониторинговой точки речной сети, например, в замыкающем створе водосбора. Для целей одновременного учета эффективности модели в нескольких мониторинговых точках существуют следующие возможности задания целевой функции:

1. осредненный критерий в виде $\mathrm{NS}_{\mathrm{mean}} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} NS_i$, где M – количество пунктов сравнения;

2. средневзвешенный критерий $\mathrm{NS}_{\mathrm{total}}$ в виде (4.1), в котором $F_0^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k} - Q_{\mathrm{ср}})^2$, $F^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k,p} - Q_{i,k})^2$, $Q_{i,k,p}$ – рассчитанный по модели расход воды в i–е сутки в k–ом пункте сравнения, $Q_{i,k}$ – фактический расход в i–е сутки в k–ом пункте сравнения, $Q_{\mathrm{ср}} = \frac{1}{MN}\sum_k \sum_i Q_{i,k}$ – средневзвешенная по всем пунктам сравнения M величина фактического расхода воды за период расчета в N суток. Если в первом случае всем гидропостам придаются равные веса, то во втором случае бóльшие веса придаются гидропостам с бóльшими среднегодовыми расходами.

Прежде чем перейти к калибровке по гидрохимическим данным, остановимся на согласовании структуры выделяемых генетических компонентов стока в модели ECOMAG и в классификации Воронкова П.П. [3]. В последней поверхностно-склоновые и почвенно-поверхностные воды образуют склоновый тип вод, в отличие от модели, где воды, образующиеся в зоне формирования поверхностного склонового (Хортоновского) стока, выделяются отдельно, а почвенно-поверхностные и почвенно-грунтовые воды по классификации Воронкова П.П. в модели объединены в почвенный тип вод. Поэтому калибровка параметров модели ECOMAG для генетических типов вод велась по процентному содержанию в речных водах грунтовой составляющей и по сумме почвенных и склоновых вод. В качестве целевой функции был принят тот же критерий Нэша–Сатклифа в форме (4.1), где в данном случае $Q_{i,p}$ – рассчитанное по модели ECOMAG процентное содержание грунтовой составляющей в речных водах в i–е сутки, Q_i – процентное содержание грунтовой составляющей в речных водах на основе анализа гидрохимических данных, $Q_{\mathrm{ср}}$ – средняя величина процентного содержания грунтовой составляющей в речных водах на основе анализа гидрохимических данных за период расчета.

В дополнение к описанным способам эффективности расчетов использовался также критерий BIAS, который характеризует относительную погрешность расчета

среднемноголетних объемов стока (или среднемноголетнего процентного содержания грунтовой составляющей в речных водах). Относительная систематическая ошибка расчета (%) оценивается как:

$$BIAS = \frac{\overline{Q_f} - \overline{Q_s}}{\overline{Q_f}} \times 100\%, \quad (4.2),$$

где Q_f и Q_s – фактическое и рассчитанное значение расхода воды, $\overline{Q}$ – среднее значение фактической величины за период расчета. В зависимости от значения критерия BIAS результаты моделирования при расчетах гидрографов стока могут считаться хорошими при $|BIAS| < 10\%$, удовлетворительными – при $10\% < |BIAS| < 15\%$ и неудовлетворительными – при $|BIAS| > 15\%$. [28] Для гидрохимических данных оценки соответствия величин гораздо менее жесткие.

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Речной сток. В табл. 5.1 представлены оценки результатов моделирования стока для трех гидропостов за периоды калибровки, валидации модели и за весь период расчета по критериям Нэша–Сатклифа и BIAS. Значения критериев для всех периодов не сильно различаются между собой, что говорит об устойчивости параметров модели.

Результаты соответствия гидрографов можно признать удовлетворительными ((0.54<NS<0.73, BIAS<10.3%), как для калибровочной, так и для проверочной серий, а также для всего периода расчета. Как видно из таблицы период верификации и весь расчетный период имеют значения выше, чем для калибровочного периода. В целом, значения не сильно отличаются между собой, что говорит об устойчивости параметров модели. Помимо этого, выбиваются отдельные годы с весьма заниженными значениями приведенного критерия. Однако, если рассматривать значения критерия Нэша–Сатклифа для отдельных лет, то можно заметить значительный разброс значений, например, для "хорошего" 1992 года они находятся в диапазоне от 0.91 до 0.96 для трех гидропостов, а для "неудачного" 1987 года отмечаются низкие значения (0.32<NS<0.39). Модель чувствительна к ошибкам и неточностям в измерении данных по расходам воды или метеорологическим данным, что объясняет полученные результаты по приведенному критерию. Такие различия в результатах соответствия гидрографов могут быть связаны как с погрешностями и неточностями в измерении расходов воды и задании метеорологических воздействий, так и неадекватностью отдельных блоков модели. Коэффициент детерминации связи рассчитанных и фактических месячных объемов притока воды в Можайское водохранилище составил 0.85 за период калибровки и 0.86 за период валидации. На рисунках 5.1, 5.2, 5.3 показаны модельные и фактические суточные гидрографы на створах р.Москва – г/п Барсуки, р.Лусянка - г/п Черники и притока воды в Можайское водохранилище за весь период расчета. Из рисунков видно удовлетворительное соответствие расчетных и фактических гидрографов на всех рассматриваемых гидропостах.

Таблица 5.1. Значения критерия Нэша-Сатклифа за периоды калибровки, валидации и весь расчетный период

Название гидрологического поста	**Площадь водосбора, км^2**	**Период расчета**								
		1982-1992			**1993-2009**			**1982-2009**		
		NS	**NS_{total}**	**BIAS**	**NS**	**NS_{total}**	**BIAS**	**NS**	**NS_{total}**	**BIAS**
р.Москва - Барсуки	750	0.60	0.62	-0.7	0.62	0.69	-13.6	0.62	0.67	-8.6
р.Лусянка - Черники	170	0.54		4.5	0.61		-7.0	0.58		-2.5
Приток к Можайскому вдхр.	1360	0.60		10.0	0.68		-0.2	0.65		4.0

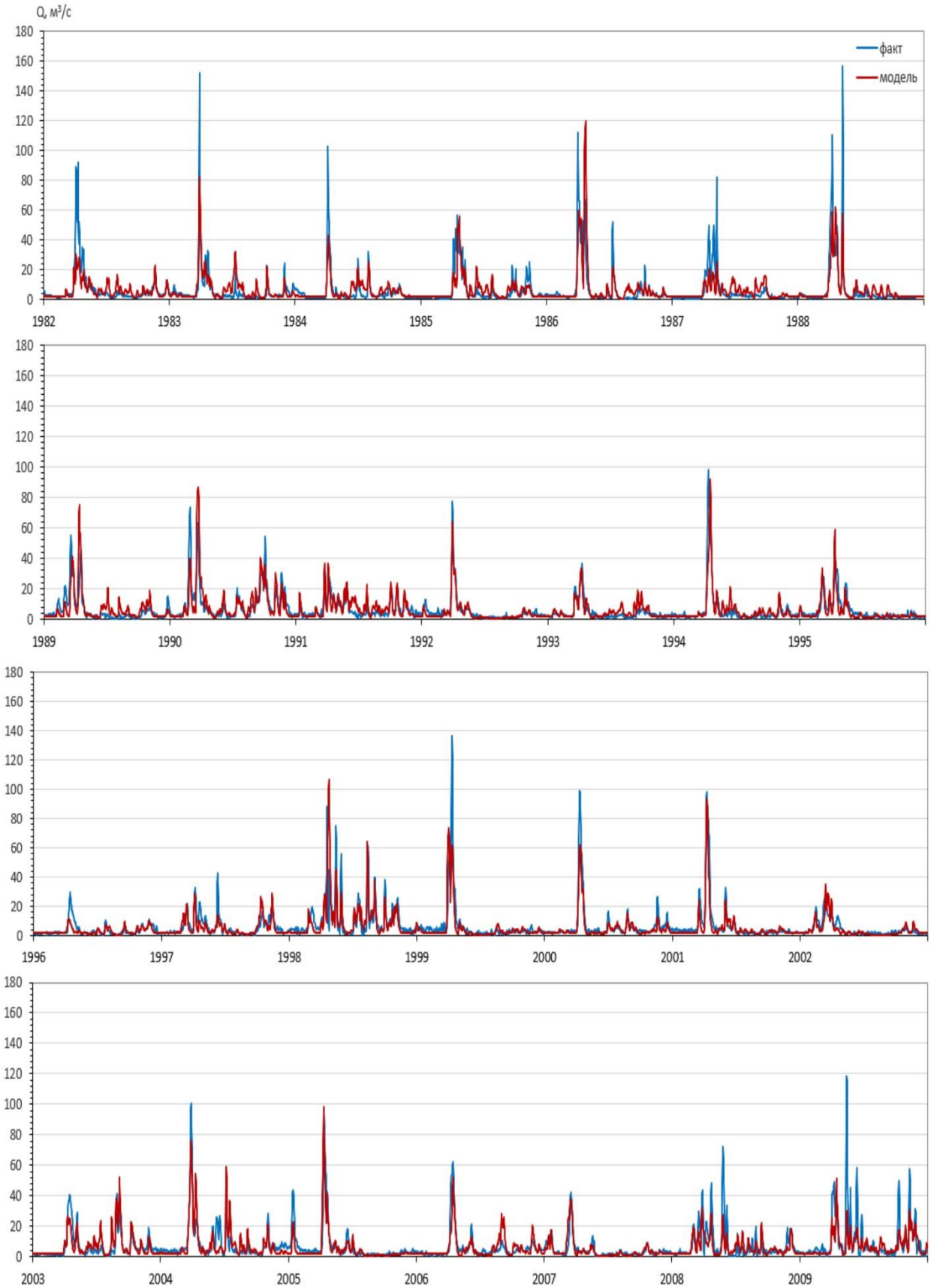

Рис. 5.1 Фактический (синий) и рассчитанный (красный) гидрографы стока на р.Москва – г/п Барсуки

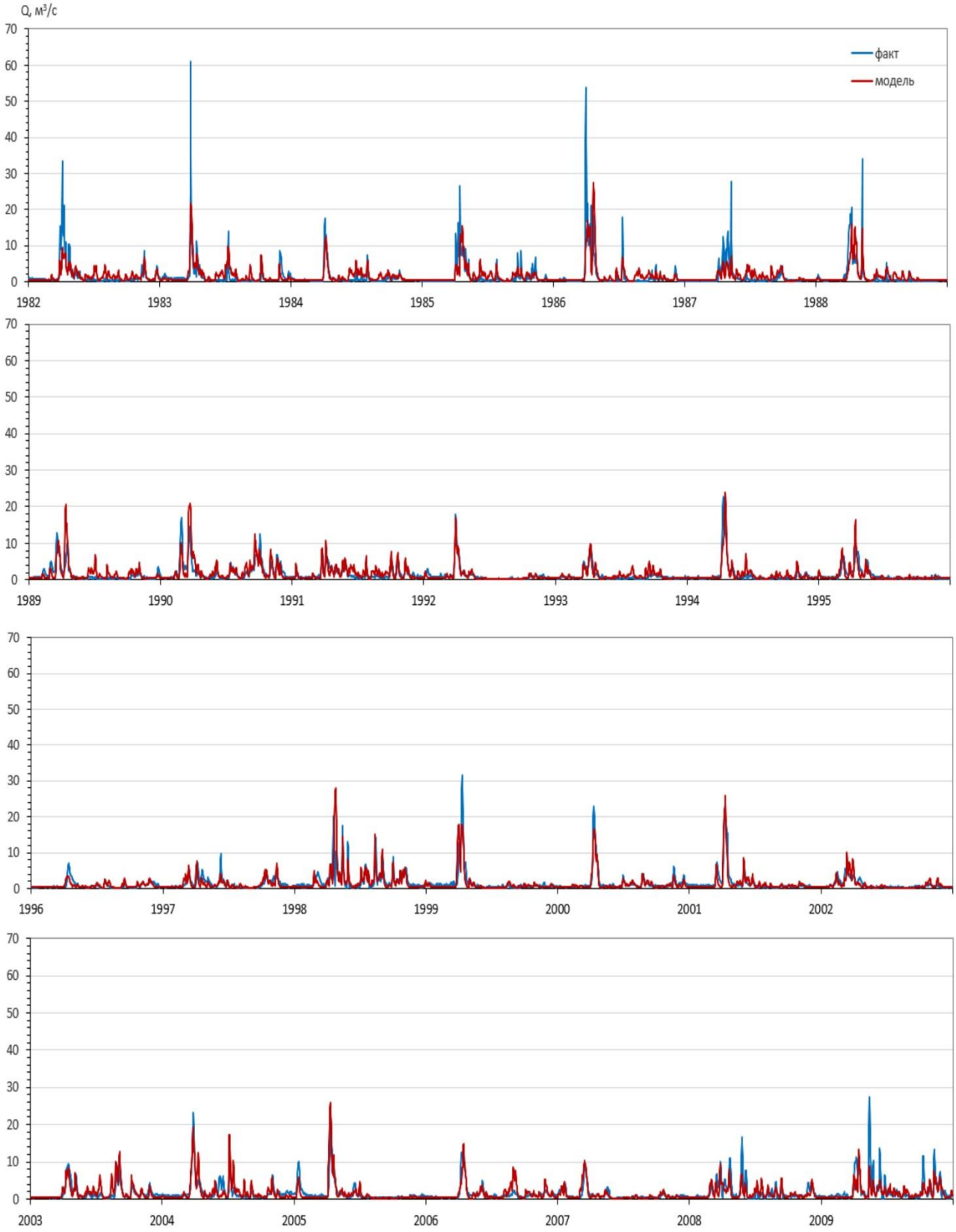

Рис. 5.2 Фактический (синий) и рассчитанный (красный) гидрографы стока на р.Лусянка - г/п Черники

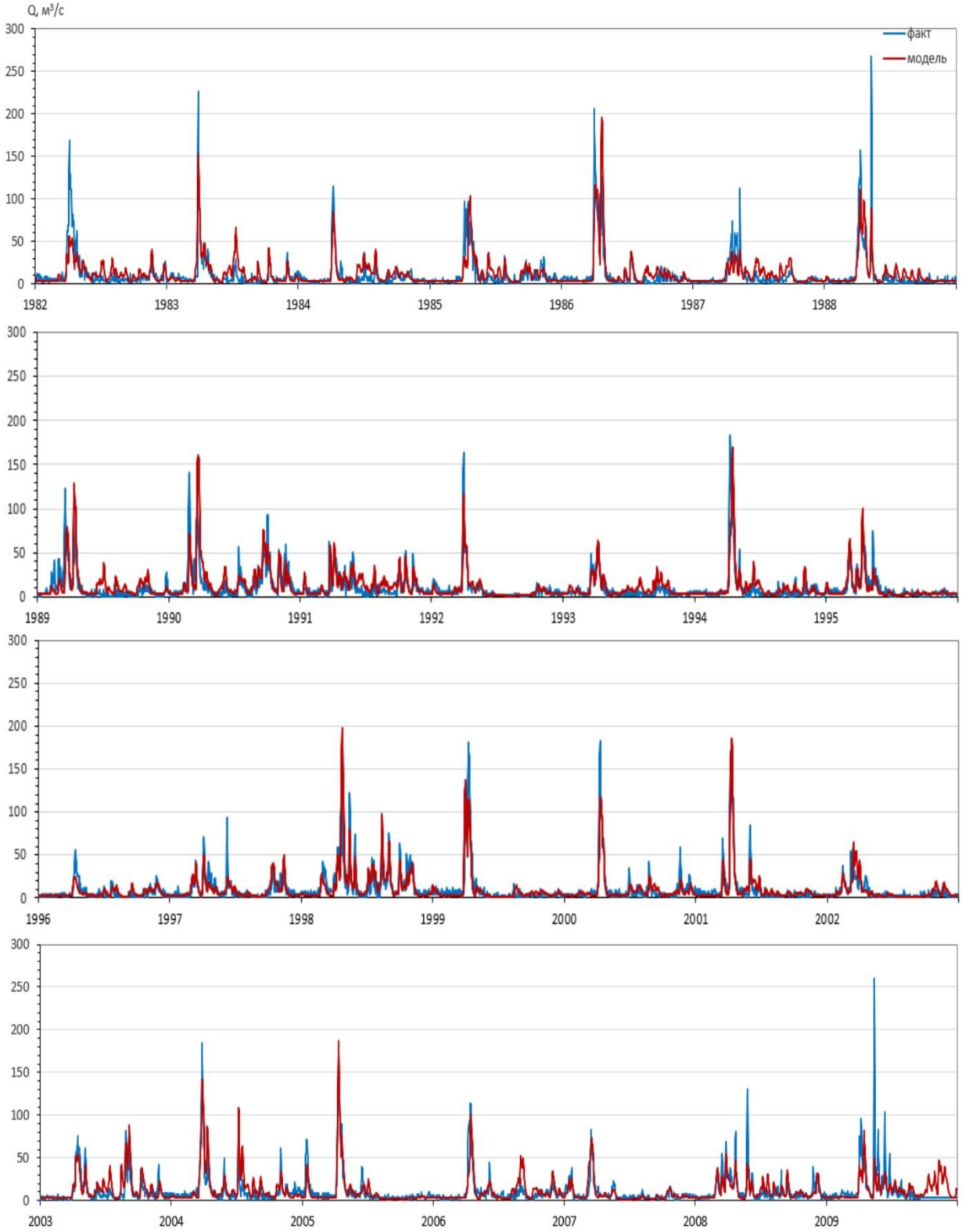

Рис. 5.3 Фактические (синий) и рассчитанные (красный) гидрографы притока в Можайское водохранилище

Генетические составляющие. Наиболее детально при калибровке модели по генетическим типам вод рассматривался 1984 год, поскольку за этот период имеются наиболее детальные входные данные характеристик химического состава (более 100 проб), и были получены процентные соотношения для каждого генетического типа вод. Значение критерия Нэша–Сатклифа модельной величины процентного содержания грунтовой составляющей в речных водах относительно величин, полученных на основе анализа гидрохимических данных в створе р. Москва – д. Барсуки, за период расчета составляет 0.54, что свидетельствует об удовлетворительной точности результатов моделирования.

Среднеарифметическая ошибка между фактическим процентным содержанием грунтового типа вод и рассчитанным в замыкающем створе за калибровочный период составляет 3,4%. По фактическим данным доля грунтового стока в течение всего периода зимней межени (январь-март) ниже, чем по модельным значениям. Это может быть связано с небольшим повышением температуры и, вследствие, увеличением стока почвенных и склоновых вод, что подтверждается на гидрографе фактических данных. Большинство превышающих ошибку значений фиксируется с апреля по август. Для таких величин долей грунтового типа вод, рассчитанных моделью, в 70 % случаев значения завышены. В целом, модель формирования химического стока хорошо описывает весеннее половодье, но дальнейшие летние паводки воспроизводит с меньшей точностью. В феврале и марте ошибка не превышает 5%, а с августа по декабрь до 10%, что свидетельствует о том, что модельные гидрографы с хорошей точностью воспроизводят наблюденные гидрографы, разделенные по генетическим составляющим. Сравнение динамики генетических составляющих фактических данных с модельными за калибровочный период на гидрометрическом посту р.Москва – г/п Барсуки показано на рисунке 5.

Для определения степени разброса данных относительно их среднего значения оценивалось стандартное отклонение по выборке. Для значений процентного содержания грунтовой составляющей, определенных по гидрохимическим данным, стандартное отклонение за весь расчетный период составило 19,3 % от речного стока, а для модельных – 23,3 %, что говорит о достаточно большой амплитуде разброса данных. Стандартное отклонение невязки между фактическими и рассчитанными по модели значениями составляет 16,3%. Значение критерия BIAS относительной погрешности расчета среднемноголетнего процентного содержания грунтовой составляющей в речных водах составило 14%. Коэффициент детерминации связи значений грунтовой составляющей, рассчитанных двумя способами (по модели и на основе

гидрохимических данных), составил 0.52 (рис. 5.4). За счет широкого разброса данных от их среднего и редких сильно выбивающихся точек значений, которые превышают значение ошибки, отмечено занижение коэффициента корреляции.

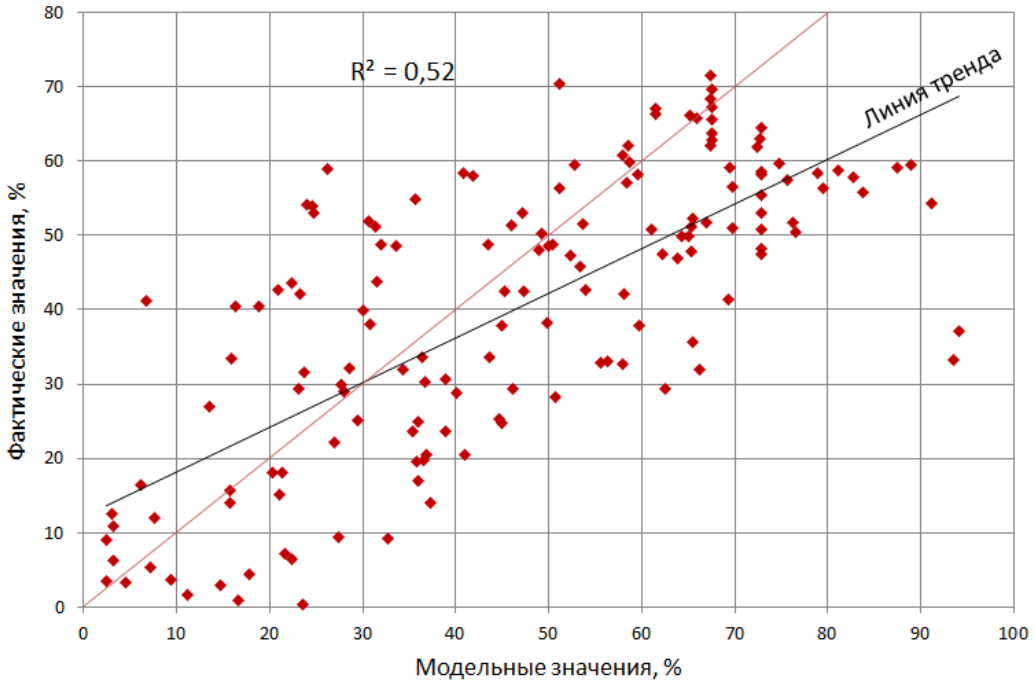

Рис. 5.4. Связь фактических и рассчитанных значений долей грунтового типа вод

Проанализируем более подробно результаты моделирования гидрографов стока и его генетических составляющих на примере 1984 и 2012 гг., когда были проведены учащенные гидрохимические наблюдения, на основании которых можно было проследить внутригодовой ход грунтовой составляющей и суммы почвенного и склонового типов вод (рис. 5.5). На рис. 5.5 выполнено сопоставление рассчитанных и измеренных гидрографов суммарного притока воды со всего водосбора в Можайское водохранилище и рассчитанной по модели и определенной по гидрохимическим данным динамики генетических составляющих стока во входном створе в Можайское водохранилище на р.Москва – д. Барсуки для 1984 и 2012 гг.

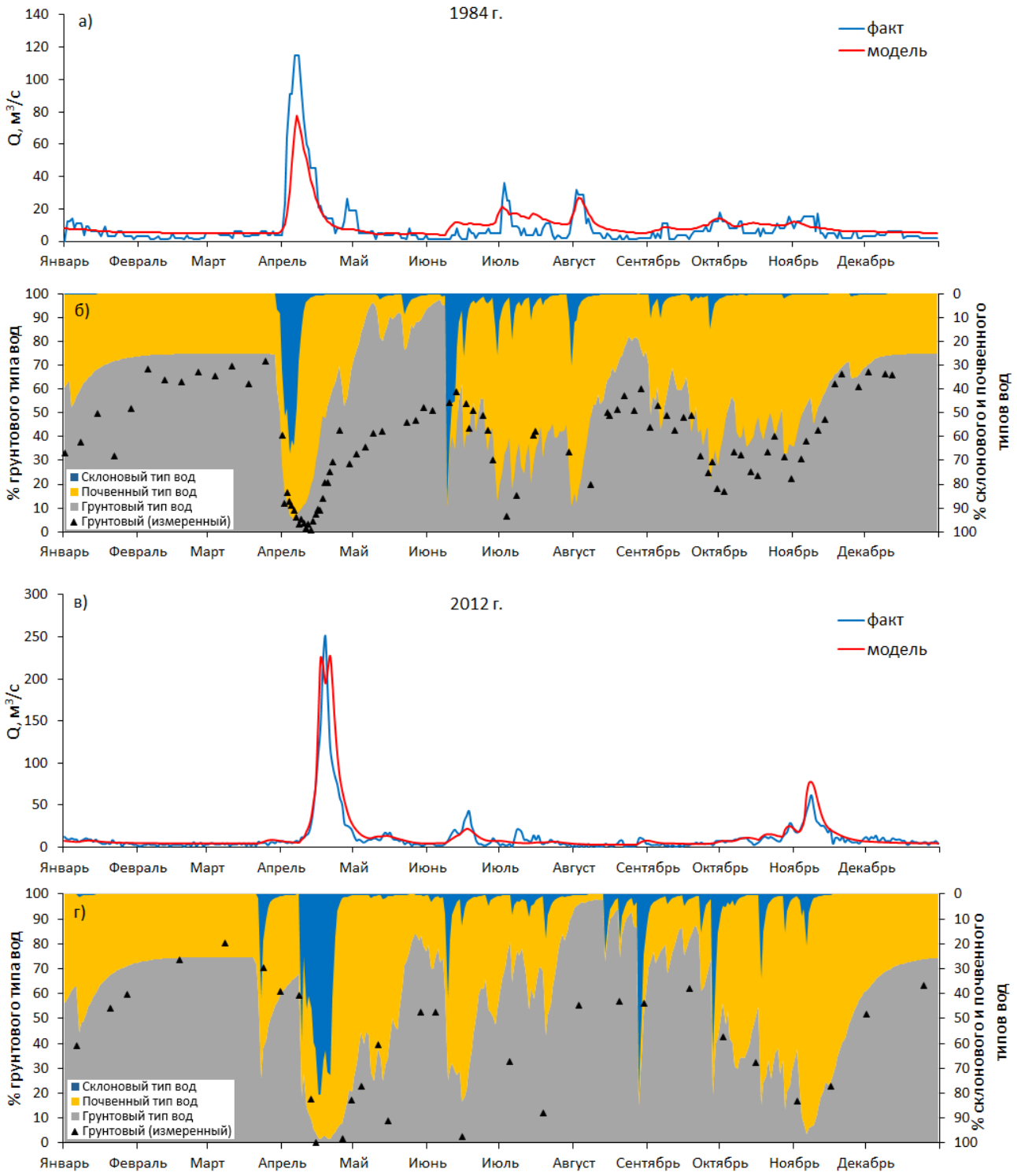

Рис. 5.5 Гидрографы притока в Можайское водохранилище (а, в) и динамика генетических составляющих стока (цветом – рассчитанных по модели, треугольниками – на основе гидрохимических наблюдений) в створе р.Москва – д. Барсуки (б, г) в 1984 и 2012 гг.

Из рисунков 5.5а, 5.5в следует, что модель формирования стока ECOMAG в целом удовлетворительно описывает различные фазы водного режима (зимнюю и

летнюю межень, весеннее половодье, летне-осенний паводковый период) во внутригодовом ходе суммарного притока воды в водохранилище (NS=0.73 для 1984 г. и NS=0.77 для 2012 г.). Можно отметить лишь заметное занижение рассчитанного пика весеннего половодья в 1984 г. относительно его фактического значения.

На основе результатов моделирования динамики генетических составляющих стока (рис. 5.5б, 5.5г) следует, что в зимнюю межень (январь-март) доминирует грунтовая составляющая питания реки, доля которой составляет около 70 % от суммарного стока. В период весеннего половодья (апрель) доля грунтовой составляющей убывает практически до 0 и, соответственно, возрастают доли почвенной и поверхностной составляющих речного стока. Доля склонового типа вод в начале этого периода достигает 80 % (2012 г.), преобладание почвенного типа вод изменяется в пределах от 20 до 90%. В периоды спада половодья (май) и летней межени (короткой в 1984 г. – июнь, в длинной 2012 г. – июнь-сентябрь) вклад грунтовой составляющей опять возрастает до 80-90%. В летне-осенний паводковый сезон (в 1984 г. – июль-ноябрь, в 2012 г. – октябрь-ноябрь) резко возрастает доля питания рек за счет внутрипочвенного стока. При интенсивных дождях заметны кратковременные всплески поверхностной составляющей стока. К началу зимней межени доля грунтовой составляющей стока опять повышается до 70%.

При сопоставлении результатов моделирования грунтовой составляющей стока с данными на основе гидрохимических измерений, в целом, можно отметить удовлетворительное согласование внутригодового хода этих величин. Так, в периоды весеннего половодья, летне-осенних паводков и зимней межени различия в оценках грунтовой составляющей, определенной на основе гидрохимических наблюдений и по результатам моделирования, большей частью находятся в пределах 10-20%. Наибольшие расхождения в процентном содержании грунтовой составляющей в суммарном стоке отмечаются в период летней межени (короткой в 1984 г. май-июнь, и длинной в 2012 г. – июль-август), когда они составляют около 40-50%. Однако учитывая, что сам сток в эти периоды очень мал и в целом невысокую точность определения типов вод химико-статистическим методом, полученные результаты можно считать вполне приемлемыми

Анализ результатов моделирования генетических составляющих стока за весь период расчета 1982-2015 гг. позволил выявить некоторые закономерности внутригодового распределения генетической структуры стока в бассейне Можайского водохранилища.

В период зимней межени (декабрь-март) для большей части лет отмечается устойчивое преобладание грунтового питания реки, доля которого достигает 70% и

более от суммарного стока на протяжении всего расчетного периода. В 1989-1993, 1995, 1999-2002, 2004-2005, 2007, 2012 гг. на протяжении зимней межени отмечаются непродолжительные периоды (несколько дней), когда превалирует почвенный тип вод, процентное содержание которого изменяется в пределах до 50-70%, а для некоторых лет (1991, 2005, 2007, 2014 гг.) достигает 90%. Такое резкое увеличение почвенного генетического типа вод связано с зимними оттепелями и вызванными ими паводками. Склоновый тип вод в период зимней межени представлен слабо (до 1%). Но в периоды зимних оттепелей иногда формируются и кратковременные пики поверхностной склоновой составляющей, доля которой в отдельные годы (1997-1998, 2000, 2001-2002, 2007 гг.) может достигать до половины суммарного речного стока и более.

В период весеннего половодья (апрель-май) доля грунтовой составляющей речного стока уменьшается и временами доходит до 2%, хотя в периоды резких похолоданий может увеличиваться до 70% (1994 г.). Но такой период непродолжительный, максимальное количество дней достигает 8. Доминирующим типом вод в эту фазу водного режима является внутрипочвенный сток (1997, 2002, 2007, 2009, 2014), содержание которого изменяется в диапазоне от 40 до 90% от суммарного стока. Продолжительность такого периода при ПТВ > 70% достигает 14 дней. В период половодья отмечается также резкое повышение (до 30 - 70%) поверхностной склоновой составляющей стока, доля которой в 1988, 1995, 1999-2000, 2010 и 2011 гг. превышала 90%. В основном это кратковременные периоды протяженностью до 10 дней. Исключением являются 2007 и 2014 гг., когда в период половодья процентное содержание склонового стока не превышало 5%.

В период летней межени (июнь-август) превалирующим генетическим типом вод по результатам моделирования является грунтовый. Причем непрерывная продолжительность преобладания (>70%) грунтовой составляющей стока может достигать 145 дней (1992 г.), из которых можно выделить непрерывный интервал фактически полного отсутствия других генетических составляющих стока. А именно, процентное соотношение грунтовой составляющей речного стока варьирует от 92 до 99% в течение 75 дней. В 2010 и 2014 гг. речной сток практически полностью сформирован грунтовым типом вод. Во время летних паводков периодически преобладающим типом вод становятся как почвенный, так и поверхностный. Например, в 1986 году отмечалось резкое кратковременное (продолжительностью два дня) увеличение поверхностной склоновой составляющей стока до 90%. В 2004 и 2010 гг. в течение более двух недель определяющим типом вод являлся почвенный, содержание которого достигало 60 - 80%. Различия в генетических составляющих питания реки

связаны, главным образом, с текущей гидрометеорологической обстановкой и предшествующим увлажнением бассейна.

В осенний период (сентябрь-ноябрь) преобладающий генетический тип питания реки выделить сложно, т.к. попеременно превалируют все рассматриваемые типы вод. Грунтовая составляющая изменяется от 10 до 70% (в 1996 году свыше 80%) в основном в сочетании с почвенным типом вод. Иногда грунтовый тип вод полностью формирует питание речного стока. Во время осенних паводков преобладает почвенный тип вод, достигающий 90% суммарного речного стока (1990, 2009, 2012 гг.). Повышенный фон почвенной составляющей может продолжаться от нескольких дней до двух-трех недель. Минимальное процентное содержание почвенной доли стока изменяется в пределах 10-30%, при этом отсутствует склоновая составляющая.

Поверхностная склоновая составляющая стока обычно практически полностью отсутствует, но в отдельные годы в периоды паводков доля поверхностно склоновых вод может повышаться до 20% (2001, 2005, 2011 гг.), реже до 70% (1995, 2014 гг.). Максимальная доля склонового типа вод отмечается в 1992 и 2002 гг., где пик достиг 88% и продолжался в течение двух дней.

В том случае, когда отмечается высокая доля (от 50 до 80 %) стока одного из типов вод, а доля другого типа больше 20% от всего стока, речная вода в этот момент времени имеет характер трансформированной водной массы (ВМ). То есть, в период осенней межени, когда отмечается преимущественная доля грунтового типа, почвенная составляющая трансформирует основной тип вод.

Примеры графиков динамики внутригодового распределения генетического состава воды за разные годы представлено на рисунке 5.6.

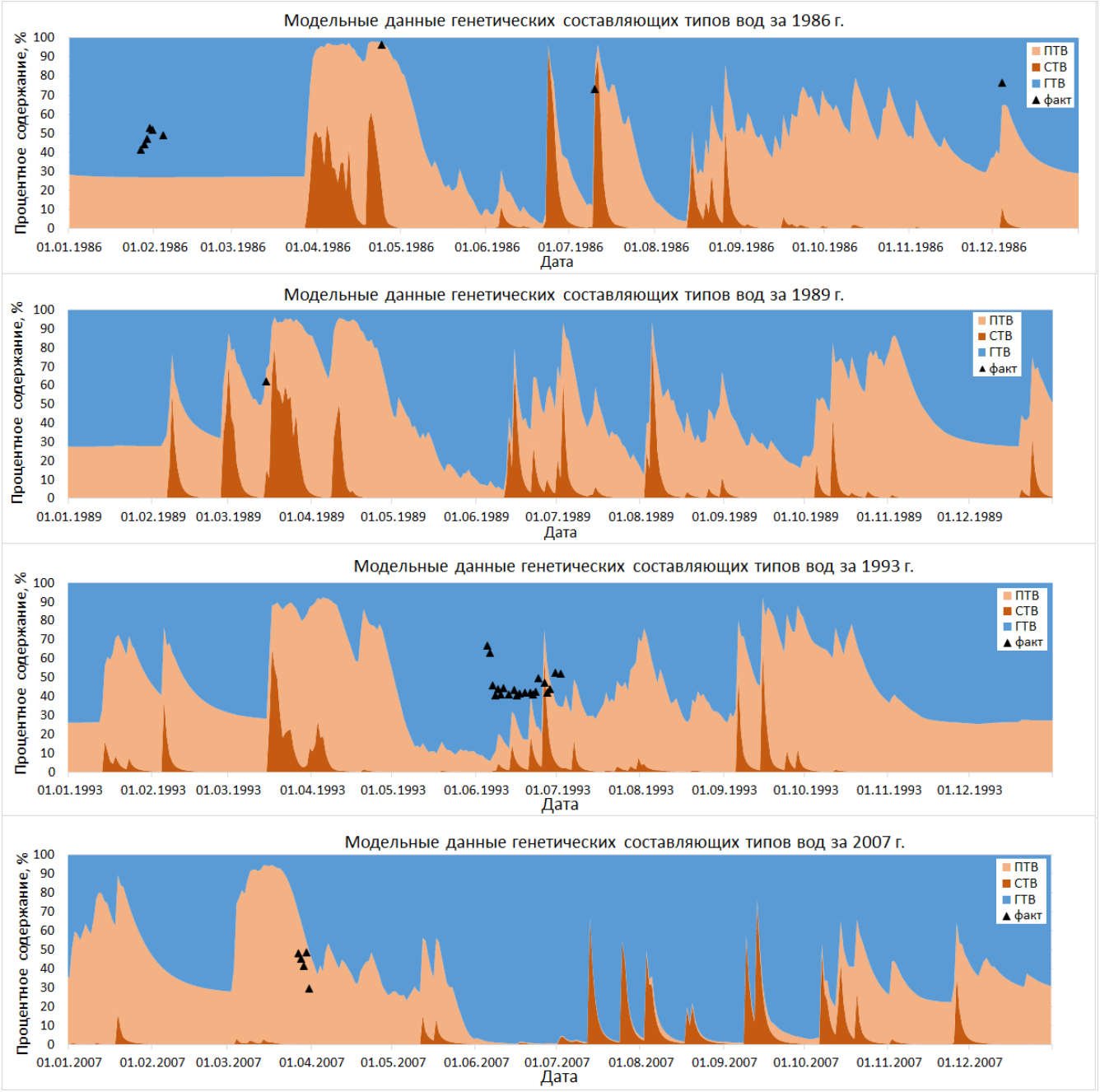

Рис. 5.6. Динамика внутригодового распределения генетических составляющих стока на в замыкающем створе Можайское вдхр - п.Гидроузел за 1986, 1989, 1993, 2007 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе модельного комплекса ECOMAG разработана физико-математическая модель формирования стока для бассейна Можайского водохранилища. С целью снижения неопределенности и эквифинальности при выборе параметров модели для их калибровки привлекались суточные гидрографы стока на 3-х гидропостах и данные по генетическим составляющим речного стока, полученные с использованием химико-статистического метода определения типов речных вод на основе гидрохимических измерений за многолетний период. Получено удовлетворительное соответствие модельных и фактических гидрографов стока на гидропостах для периодов калибровки, валидации и за весь 34 летний период расчетов (1982 – 2015 гг.). Значения статистических критериев соответствия модельных и полученных на основе анализа гидрохимических данных генетических составляющих питания речных вод также свидетельствуют об удовлетворительной точности расчетов. Выполнен анализ результатов моделирования динамики генетических составляющих на фоне внутригодового хода стока для 1984 и 2012 гг., когда были проведены учащенные гидрохимические наблюдения. Получено удовлетворительное согласование внутригодового хода грунтовой составляющей стока, рассчитанной по модели и определенной по гидрохимическим измерениям. Наибольшие различия в доле грунтовой составляющей, достигающие 40-50%, прослеживаются в период летней межени. В остальные сезоны различия находятся в пределах 10-20%. По результатам моделирования за весь 34-летний период расчетов выполнен анализ закономерностей внутригодового распределения генетических составляющих стока и выявлены преобладающие генетические типы вод в различные фазы водного режима. Таким образом, предложенный метод определения параметров модели по гидрометрическим и гидрохимическим данным позволяет рассчитать не только гидрографы стока в различных створах речной сети, но и сделать количественные оценки динамики источников питания реки и описать пространственно-временную генетическую структуру речного стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антохина Е. Н. Применение ИМК ECOMAG для моделирования стока воды с различных по площади водосборов / Антохина Е. Н., Жук В. А. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 4. С. Антохина Е. Н. Применение ИМК ECOMAG для моделирования стока воды с различных по площади водосборов / Антохина Е. Н., Жук В. А. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 4. С. 17-32.
2. Беднарук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство, 2017. №7. С. 22-35.
3. Воронков П.П. Гидрохимия местного стока европейской территории СССР. Л.: Гидрометиздат. 1970. 188 с.
4. Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шамов В.В. Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 4. С. 161–190.
5. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К. Разделение гидрографа стока на генетические составляющие // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 97–108.
6. Кичигина Н.В., Губарева Т.С., Шамов В.В., Гарцман Б.И. Трассерные исследования формирования речного стока в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 60–69
7. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.: Наука, 1983. 216 с.
8. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). М., ИВП РАН. 2008. 394 с.
9. Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометиздат. 1987. 296 с.
10. Мотовилов Ю.Г., Фащевская Т.Б. Пространственно распределенная модель формирования стока тяжелых металлов в речном бассейне // Вода: химия и экология, № 1-3 2018. с. 18–31.
11. Мотовилов Ю.Г. Моделирование формирования стока в речных бассейнах при изменении пространственных масштабов. 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы. 2016. № 3. С. 243-253.
12. Мотовилов Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2. Результаты испытаний // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С.743-753.

13. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // Метеорология и гидрология. 2017. Т. 42. № 2. С.121-128.
14. Научно-прикладной справочник по климату СССР // Серия 3: Многолетние данные. Ч. 1-6, вып. 8: Москва и Московская область. – М., 1990. – 256 с.
15. Основные гидрологические характеристики // Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 10. Верхне-Волжский район. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979.
16. Почвы Московской области и их использование. Том 1 // Почвенный институт им. В.В. Докучаева – М.: ГУГК, 2002. - 500 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 10. Верхнее-Волжский район, Книга 1. – М.: Московское отделение Гидрометеоиздата, 1973.
18. Эдельштейн К.К., Смахтина О.Ю. Генетическая структура речного стока и химико-статистический метод выделения ее элементов. Водные ресурсы, 1991, №5, с. 5-20.
19. Beven K. Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models // J. Hydrol. 1989. V. 105. P. 157–172.
20. Bloschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review // Hydrol. Proc. 1995. V. 9. P. 251–290.
21. Cristophersen N., Hooper R.P. Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal component analysis for the end-member mixing problem // Water Resources Research. 1992. V. 28. P. 99–107.
22. 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, 2016, DOI 10.1007/s10584-016-1710-5.
23. Gelfan A., Motovilov Yu, Krylenko I., Moreido V., Zakharova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions. // Hydr. Sci. J., 60 (8), 2015, 1266-1285.
24. Gelfan A., Semenov V., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., and Kovalev E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // Hydrol. Earth Syst. Sci. V.19. 2015. P. 2737-2754.
25. Hooper, R.P. (2003). Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. Water Resources Research, 39(3), 1055. https://doi.org/10.1029/2002WR001528
26. Liu, F., Williams, M. W., & Caine, N. (2004). Source waters and flow paths in an alpine catchment, Colorado Front Range, United States. Water Resources Research, 40(9), W09401
27. Madsen H. (2003) Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives // Advan. Water Resours., 26, 205-216.
28. Moriasi D.N., Gitau M.W., Pai N., Daggupati P. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria // Trans. ASABE. V.58 (6). 2015. P. 1763-1785.

29. Motovilov Y.G., Gelfan A.N. Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches // IAHS Publ. V.360. 2013. P. 105-112
30. Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland L., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // Agricultural and Forest Meteorology.V.98-99. 1999. P. 257-277.
31. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. 10 (3): 282–290.
32. Zhang Q., J.F. Knowles, R.T. Barnes, R.M. Cowie, N. Rock, M. W. Williams. Surface and subsurface water contributions to streamflow from a mesoscale watershed in complex mountain terrain // Hydrological Processes. 2018. 32 (7) :954-967