

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*на правах рукописи*



**Сучкова Ксения Викторовна**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ  
РЕЧНОГО СТОКА НА ВОДОСБОРЕ МОЖАЙСКОГО  
ВОДОХРАНИЛИЩА**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)

**Научный руководитель:** **Мотовилов Юрий Георгиевич**  
*доктор географических наук*  
(специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия)

**Официальные оппоненты:** **Кондратьев Сергей Алексеевич**  
*доктор физико-математических наук*  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озераведения Российской академии наук (г. Санкт-Петербург)

**Киреева Мария Борисовна**  
*кандидат географических наук*  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (г. Москва)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится «**25**» **марта 2021** года в **11 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН (<http://www.iwrp.ru>), а также на сайте ВАК (<http://vak.ed.gov.ru/>).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.040.01.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



М.А. Соколовский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Исследование генетических составляющих речного стока – классическая задача гидрологии речных бассейнов, решение которой становится все более актуальным в связи с необходимостью углубления представлений о механизмах отклика гидрологических систем речного бассейна на изменения климата и антропогенных воздействий, процессах взаимодействия поверхностных и подземных вод, закономерностях формирования качества речных вод в речном бассейне, процессах склоновой водной эрозии и др. Существуют четыре основных подхода к оценке генетических составляющих речного стока: (1) прямые натурные измерения на малых экспериментальных бассейнах (Бефани А.Н., Субботин А.И., Freeze R. A., Cherry J. A., Kirchner J. W.), (2) косвенные оценки с использованием трассеров (Гарцман Б.И., Pinder G.F., Jones J. F., Christophersen N, Hooper R.P., McDonnell J.J., Klaus J.), (3) графоаналитические методы «расчленения гидрографа» (Куделин Б.И., Веригин Н.Н., Воскресенский К. П., Попов О.В., Линслей Р.К., Эдельштейн К.К., Eckhardt К.), (4) методы физико-математического моделирования формирования речного стока и его генетических составляющих (Кучмент Л.С., Виноградов Ю.Б., Назаров Н.А., Кондратьев С.А., Even K., Blöschl G., Sivapalan M, Woolhiser D.A., Freeze R. A.). Первые три подхода, при всех различиях в методологии, точности получаемых оценок и требований к исходной информации, имеют весьма ограниченное применение для решения задач в условиях трансформации механизмов формирования речного стока под влиянием изменений климата и антропогенной нагрузки на речные бассейны (изменения землепользования, гидротехническое строительство, откачки подземных вод и др.). Возможности решения таких экстраполяционных задач связаны, прежде всего, с использованием физико-математических моделей формирования речного стока, которые описывают процессы взаимодействия поверхностных, почвенных и грунтовых вод по метеорологическим данным, и параметры которых зависят от измеряемых физических характеристик речного бассейна. Вместе с тем, применение моделей сдерживается недостаточностью имеющихся данных для верификации результатов расчета генетических составляющих стока, вследствие чего возникает большая неопределенность этих результатов, обусловленная, в том числе наличием проблемы эквивалентности (суть проблемы – в существовании нескольких наборов параметров модели, при которых рассчитанные гидрографы стока в замыкающем створе водосбора одинаково близки к наблюдаемым, но генетические составляющие расчетных гидрографов – существенно отличаются).

Исследование возможностей снижения неопределенностей при моделировании генетических составляющих речного стока путем расширения информационного содержания модели на основе трассерных данных составляет научное содержание представляемой работы.

**Цель работы** – разработка методов расчета генетических составляющих речного стока и их возможной трансформации при изменении климата на основе физико-математической модели его формирования и гидрохимического способа идентификации источников стокообразования (на примере водосбора Можайского водохранилища).

**Для достижения заявленной цели были решены следующие задачи:**

- Осуществлена адаптация физико-математической модели формирования речного стока на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG для бассейна Можайского водохранилища;
- Проведены численные эксперименты и анализ чувствительности модели формирования стока к данным о пространственном распределении характеристик подстилающей поверхности;
- Разработан метод калибровки модельных параметров по гидрометрическим и гидрохимическим данным для смягчения эффекта эквивинальности при моделировании генетических составляющих речного стока;
- Проведены испытания модели формирования генетических составляющих стока с учетом гидрохимического способа идентификации водных масс в периоды детальных гидрохимических съемок 1984, 2012 и 2019 г.;
- Оценено влияние возможных климатических изменений на трансформацию генетической структуры речного стока.

**Объект и исходные материалы исследований.** Объект исследования – бассейн Можайского водохранилища. Для проведения исследования использовались данные гидрологического и метеорологического мониторинга с 1982 по 2015 гг., картографические источники о характеристиках подстилающей поверхности бассейна. Моделирование формирования речного стока выполнялось с помощью информационно-моделирующего комплекса ECOMAG (автор Ю.Г. Мотовилов, правообладатель ИВП РАН).

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработана пространственно-распределенная физико-математическая модель формирования генетических составляющих речного стока на водосборе Можайского водохранилища с использованием гидрохимического способа идентификации водных масс;
2. Предложен метод калибровки параметров модели формирования стока по гидрометрическим и гидрохимическим данным для смягчения эффекта эквивинальности и повышения идентифицируемости параметров модели при расчетах генетических составляющих

речного стока;

3. Исследованы закономерности межгодовой и сезонной динамики генетических составляющих речного стока в различные фазы водного режима для бассейна Можайского водохранилища;

4. Выполнен анализ чувствительности генезиса речного стока к возможным климатическим изменениям и получены количественные оценки трансформации его генетической структуры для бассейна Можайского водохранилища.

**Практическая значимость проведенных исследований заключается:**

- в адаптации физико-математической модели формирования стока в бассейне Можайского водохранилища, позволяющей с удовлетворительной по принятым критериям точностью рассчитать гидрографы стока разного временного усреднения (сутки, месяц, год) в основном русле реки и на ее притоках за многолетний период;
- в усовершенствовании физико-математической модели формирования стока, рассчитывающей генетические составляющие речного стока, которые позволяют оценивать источники питания воды для решения различных задач, связанных с формированием качества воды, притекающей в Можайское водохранилище;
- в определении внутригодовой и сезонной динамики генетических составляющих стока с выявлением преобладающих генетических типов вод в различные фазы водного режима при возможных климатических изменениях и антропогенном воздействии на окружающую среду.

**Защищаемые положения:**

1. Разработанная на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG физико-математическая модель формирования стока на водосборе Можайского водохранилища адекватно описывает режим стока в пунктах гидрометрических наблюдений. Однако без привлечения дополнительной информации для калибровки параметров по источникам питания реки результаты моделирования генетических составляющих речного стока будут неустойчивы (эквивинальность).

2. Разработан метод калибровки параметров модели формирования стока по гидрометрическим и гидрохимическим данным с целью смягчения эффекта эквивинальности и повышения идентифицируемости параметров модели при расчетах генетических составляющих речного стока. Результаты испытаний модели с учетом гидрохимического способа идентификации водных масс в периоды детальных гидрохимических съемок 1984, 2012 и 2019 гг. показали многолетнюю устойчивость механизма формирования генетической структуры стока на водосборе;

3. Изменения климатических норм осадков (в пределах -10% - +20%) и температуры воздуха (в пределах -1°C - +2°C) слабо сказываются на изменении абсолютных значений грунтовой составляющей речного стока, однако вследствие значительных изменений поверхностной и внутрипочвенной составляющих генетическая структура речного стока (доли составляющих в процентном отношении) может претерпевать значительные трансформации.

#### **Обоснованность и достоверность результатов работы.**

Все полученные результаты расчетов по модели формирования стока были проверены на материалах наблюдений, полученных в надежных источниках (данные гидрологического мониторинга Росгидромета и данные гидрологического и водохозяйственного мониторинга Росводресурсов). Для проверки надежности расчетов были использованы общепринятые в научном сообществе методики и критерии.

#### **Личный вклад автора.**

Автором лично было выполнено: разработка модели формирования стока бассейна Можайского водохранилища на базе ИМК ЕСОМАГ, калибровка и верификация модели по гидрометрическим данным и на основе гидрохимических измерений, проведение и обработка результатов численных экспериментов по оценке чувствительности модели к пространственному разрешению характеристик подстилающей поверхности, проведение численных экспериментов для выявления эффекта эквививальности, анализ закономерностей внутригодового распределения генетических составляющих стока, проведение полевых исследований с целью проверки модели на независимом материале и изучения взаимодействия различных источников питания речного стока на основе модели смешения, освоение и апробация российских и зарубежных графоаналитических методов расчленения гидрографа, проведение численных экспериментов по оценке чувствительности стока и его генетических составляющих к климатическим изменениям.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих российских и зарубежных конференциях:

Всероссийская научная конференция с международным участием «Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения» (Сочи, 2017); School for Young Scientists “Modelling and forecasting of river flows and managing hydrological risks: towards a new generation of methods” (Moscow, Russia, 2018); Всероссийская научная конференция «Волга и ее жизнь» (Борок, 2018); VII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2019); The 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly 2019. Session H05 «Tracers For Understanding the Sources, Pathways and Fate Of Pollutants in the Hydrological Cycle» (Montréal, Canada, 2019); Всероссийская научная конференция с международным участием «Научные проблемы

оздоровления российских рек и пути их решения» (Нижний Новгород, 2019); Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ» (Санкт-Петербург, 2020).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из 4 глав, введения и заключения. Объем работы составляет 157 страниц, включая 63 рисунка и 24 таблиц. Библиографический список содержит 157 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность и признательность своему научному руководителю д.г.н. Ю.Г. Мотовилову за помощь и поддержку во время выполнения диссертационной работы и всему коллективу Отдела гидрологии речных бассейнов ИВП РАН за помощь при подготовке настоящей работы. Отдельную благодарность автор выражает коллективу Красновидовской учебно-научной станции географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова к.г.н. В.В. Пуклакову, к.г.н. Д.И. Соколову и к.г.н. О.Н. Ериной, а также коллективу Ивановской научно-исследовательской лаборатории (Ивановская НИС) ИВП РАН. Автор особо признателен своей семье за поддержку и терпение на протяжении всего времени работы над диссертацией, а также помощь в проведении полевых работ.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также приводятся сведения об апробации результатов работы.

В **главе 1** приведен обзор проведенных исследований по оценке генетических составляющих речного стока, а также существующих методов расчленения гидрографа.

В **разделе 1.1** описаны общие представления о генетической структуре речного стока, а также приведена история развития исследований расчленения гидрографа. Под генетической структурой речного стока понимается сочетание различных генетических типов вод – склоновых, почвенных, грунтовых, определяемое спецификой химического состава вмещающих горизонтов толщи почв и грунтов, дренируемых рекой. В общем виде речной сток определяется соотношением приходной и расходной частей водного баланса. В период межени, когда полностью отсутствуют атмосферные осадки, речной сток в основном формируется за счет разгрузки подземных вод (почвенные воды, формирующиеся в верхней части зоны неполного насыщения, и грунтовые воды, движение которых происходит в зоне полного

насыщения). Проблема расчленения гидрографа и выделение подземного стока, как базовой составляющей речного стока, исследуется уже более ста лет.

**Раздел 1.2** делится на три подраздела, где представлен обзор существующих методов расчленения гидрографа. В первом подразделе описываются численные и эмпирические методы. Количественная оценка доли различных видов питания в формировании стока часто осуществляется с помощью графического расчленения гидрографа по видам питания [Куделин, 1966; Веригин, 1963; Линслей и др., 1962]. Однако помимо графических методов некоторые классические численные методы разделения подземного стока не основаны на общепринятых гидрологических представлениях, такие методы базируются на обработке гидрографа как сигнала [Sloto, Crouse, 1996; Rutledge, 1998]. Методы основаны на предположении, что время добегания поверхностного стока намного меньше, чем время добегания подземного стока, и это время относительно постоянно между различными паводковыми явлениями. В эту группу также входят методы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей [Corzo, Solomatine, 2007]. Второй подраздел включает в себя методы, основанные на физико-химическом различии между поверхностным (быстрым) и подземным (медленным) стоком, базирующиеся на предположении, что эти воды поступают из различных источников. С помощью этих характеристик можно использовать уравнения смешения для получения относительного количественного вклада каждого источника, применяя метод массбаланса [Pinder и Jones, 1969; Klaus, McDonnell, 2013; Kirchner, 2019; Hooper, 2003]. В третьем подразделе описываются концептуальные методы. К этой группе в основном относятся методы расчленения гидрографа, которые основаны на анализе кривой спада или истощения стока [Tallaksen, 1995; Pelletier, Andréassian, 2020].

В **разделе 1.3** рассматривается связь различных методов расчленения гидрографа. Все вышеперечисленные методы имеют как преимущества, например минимальное количество требуемой информации, так и недостатки, как, например невозможность учитывать отдельные физические процессы, протекающие на водосборе. Численные, эмпирические, концептуальные методы расчленения гидрографа реки могут предоставить относительно точную информацию о количественных оценках грунтовой составляющей стока, однако для понимания генетической структуры речного стока часто недостаточно применения только этих методов и требуется дополнять исследования методами расчленения стока, основанными на физико-химических данных [Smakhtin, 2001; Gonzales et al., 2009].

**Глава 2** посвящена вопросам разработки и адаптации модели формирования речного стока для бассейна Можайского водохранилища на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG [Motovilov et al., 1999; Мотовилов, Гельфан, 2019]. Исследуемый бассейн достаточно хорошо изучен и уже являлся объектом гидрологического моделирования в



исследованиях Е.Н. Антохиной [Антохина, 2012] для задач водообеспечения Московского региона и Н.С. Ясинского [Ясинский, 2019] для выявления закономерностей стока фосфора на основе модели речного и биогенного стока НУРЕ. В настоящей работе основной акцент сделан на исследованиях генетической структуры речного стока в бассейне Можайского водохранилища.

В **разделе 2.1** рассмотрены физико-географические, климатические и гидрологические характеристики бассейна Можайского водохранилища.

В **разделе 2.2** представлены общая структура модели, основные расчетные уравнения и алгоритмы модели, пространственная схематизация водосбора, состав и структура информационного обеспечения модели, привлекаемых для проведения гидрологических расчетов по модели формирования стока в бассейне р. Москвы. В качестве основных видов картографической информации для формирования баз данных о характеристиках речных бассейнов используются следующие материалы: цифровые модели рельефа различного пространственного разрешения; серии тематических карт (водных ресурсов, почвенная, ландшафтная и т.д.); карты-схемы пунктов наблюдений за состоянием окружающей среды. Базовый вариант цифровой модели рельефа (ЦМР) на бассейн р. Москвы был получен путем растривания векторной топографической карты рельефа масштаба 1: 50 000 [Антохина, Жук, 2011] на сетке с разрешением 100x100 м. Базовые варианты цифровых почвенной и ландшафтной карт на территорию бассейна были построены путем растривания на сетку 100x100 м векторных карт соответственно 1: 500 000 и 1: 200 000 масштабов. Параметры модели назначались с учетом пространственного распределения типов почв и ландшафта по территории бассейна. На водосборе Можайского водохранилища были выделены три типа почв (подзолистая, дерново-среднеподзолистая, дерново-сильноподзолистая) и три вида ландшафта (пашня, широколиственный лес, темнохвойный лес). Кроме базового варианта, для схематизации водосборной площади и моделирования процессов формирования стока использовался и более грубый вариант цифровых карт с разрешением 2x2 км. В качестве входной информации в модели задавались многолетние ряды суточных сумм осадков, среднесуточных значений температуры и влажности воздуха по данным наблюдений на 10 метеостанциях. Для калибровки параметров и валидации модели в бассейне р. Москвы были собраны ежедневные данные о расходах воды на гидрометрических постах Барсуки (р. Москва), Черники (р. Лусьянка), Колочь (р. Колочь) и общем притоке воды к Можайскому водохранилищу (пос. Гидроузел). Однако поскольку р. Колочь зарегулирована, и вклад этой реки в общий приток в Можайское водохранилище относительно невелик, то данные наблюдений за стоком на реке Колочь в дальнейших результатах не задействованы. Период

наблюдений на гидрометрических постах и на Можайском водохранилище составляет с 1982 по 2009 гг.

В разделе 2.3 описаны методика калибровки параметров и оценки эффективности модели, а также результаты калибровки и проверки модели по данным о речном стоке в различных створах речной сети. Калибровка параметров проводилась по суточным гидрографам стока на 3-х гидропостах за период 2000-2009 г., валидация осуществлялась для периода 1982-1999 г. В качестве входных данных использовались фактические данные, измеренные на метеорологических станциях. Оценки результатов моделирования стока за периоды калибровки, валидации модели и за весь период расчета по общепринятому в гидрологии критерию Нэша–Сатклифа и относительной систематической погрешности BIAS представлены в табл. 1, из которой видно, что значения критериев для всех периодов не сильно различаются между собой, что говорит об устойчивости параметров модели. На рисунке 1 показаны модельные и фактические суточные гидрографы притока воды в Можайское водохранилище за весь период расчета.

Таблица 1. Значения критерия Нэша–Сатклифа за периоды калибровки, валидации и весь расчетный период

Название гидрологического поста	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Период расчета									
		1982-1999			2000-2009			1982-2009			
		NS	NS <sub>total</sub>	BIAS	NS	NS <sub>total</sub>	BIAS	NS	NS <sub>total</sub>	BIAS	
р.Москва - Барсуки	750	0.59	0.63	-0.7	0.70	-13.6	0.75	0.63	0.67	-8.6	
р.Лусянка - Черники	170	0.51		4.5	0.68			-7.0		0.56	-2.5
Приток к Можайскому вдхр.	1360	0.61		10.0	0.70			-0.2		0.64	4.0

В разделе 2.4 для исследования чувствительности модели формирования речного стока к пространственному разрешению характеристик подстилающей поверхности кроме базового варианта модели с разрешением характеристик 100x100 м были задействованы цифровые модели еще двух пространственных разрешений: (1) более детальный вариант ЦМР с разрешением 50x50 м с использованием почвенной карты бассейна р. Москвы масштаба 1: 500 000 и ландшафтной карты масштаба 1: 200 000; (2) вариант с грубым разрешением ЦМР 2x2 км с использованием почвенной и ландшафтной карт масштаба 1: 2 500 000. В дополнение к базовому варианту были построены модели формирования речного стока для этих вариантов пространственных разрешений характеристик подстилающей поверхности. Проведены три

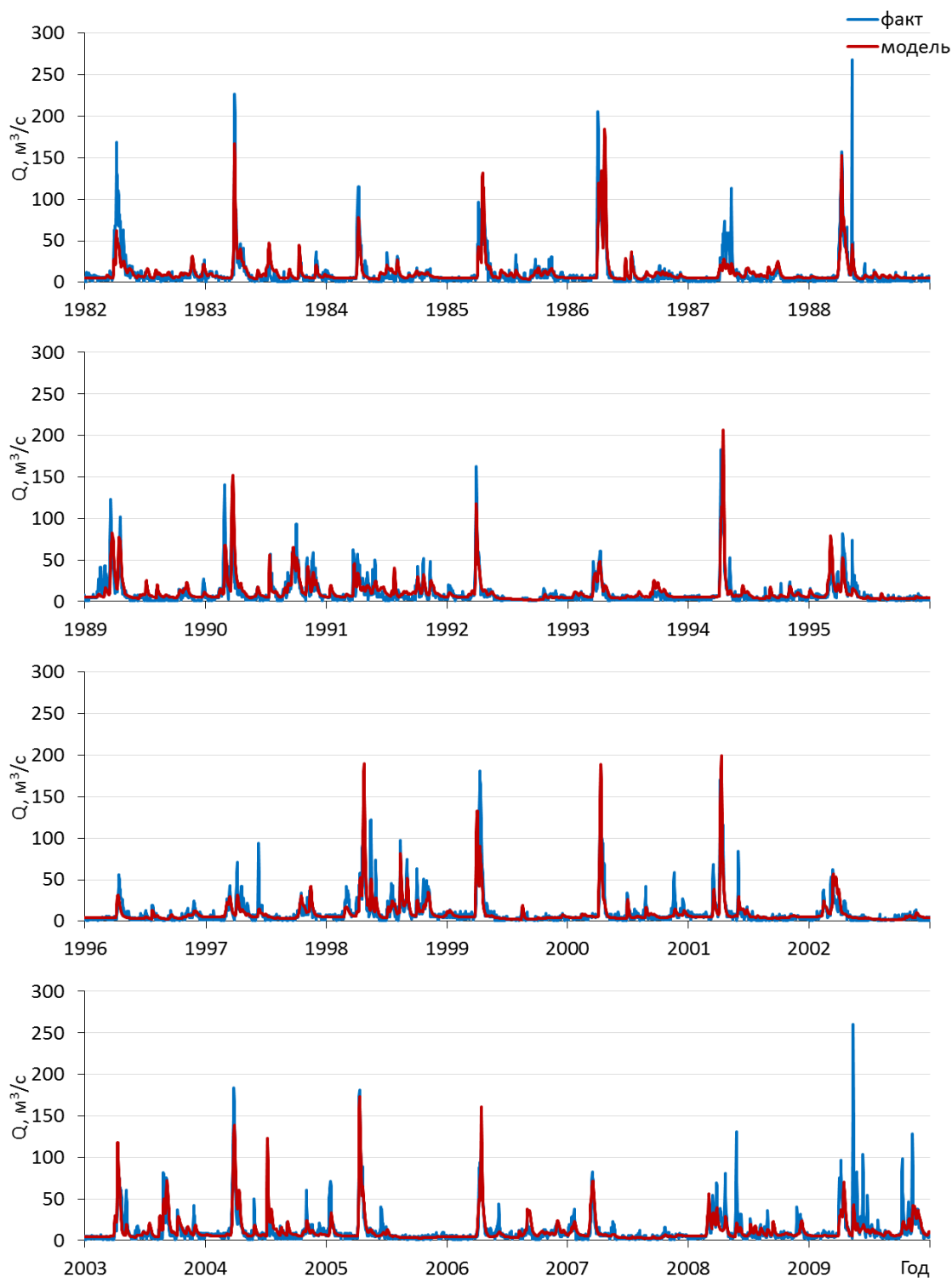


Рис. 1 Фактические (синий) и рассчитанные (красный) гидрографы притока в Можайское водохранилище

численных эксперимента, направленных на исследование чувствительности модели к пространственному разрешению характеристик подстилающей поверхности. В первом численном эксперименте, при варианте калибровки параметров модели отдельно для каждого из вариантов пространственного разрешения ЦМР и других характеристик поверхности

водосбора (почвы, землепользование) слабо влияет на результаты расчетов стока. Во втором численном эксперименте при переносе параметров модели, откалиброванных для пространственного разрешения 100x100м, в модель формирования стока с разрешением характеристик подстилающей поверхности 50x50м и 2x2 км, различия в результатах неоднозначные. Двукратное увеличение пространственного разрешения характеристик подстилающей поверхности по статистическим критериям незначительно влияет на чувствительность модели формирования речного стока, а двадцатикратное уменьшение пространственного разрешения (2x2 км) может приводить к существенному ухудшению результатов моделирования. В третьем численном эксперименте исследована чувствительность модели к количеству и размерам выделенных расчетных элементов модели и детальности структуры модельной речной сети. Выявлено, что детальность разбиения водосборной площади и речной сети на расчетные элементы незначительно влияет на результаты расчетов.

В разделе 2.5 на основании численных экспериментов продемонстрирован эффект эквивалентности на примере моделирования генетических составляющих стока в бассейне Можайского водохранилища.

В связи с тем, что мониторинг отдельных процессов гидрологического цикла (например, поверхностного, внутрипочвенного, грунтового стока) сталкивается со значительными сложностями, параметры модели, связанные с этими процессами, приходится калибровать по данным наблюдений за другими факторами, например, за стоком в замыкающем створе водосбора. Нахождение набора параметров путем обратного моделирования методом проб и ошибок по данным наблюдений за такой интегральной характеристикой водосбора как суммарный гидрограф стока может быть не единственным, т.е. чисто математически можно подобрать большое количество наборов калибровочных параметров, примерно с одинаковой точностью воспроизводящих гидрограф в замыкающем створе (эквивалентность, [Even, 2001]). Представим два различных набора калибровочных параметров, доставляющих примерно одинаковую точность моделирования гидрографа стока. Фактически, они представляют собой модели двух разных речных бассейнов, где вклад генетических составляющих стока в суммарный гидрограф может кардинально отличаться: в одном случае в суммарном гидрографе может превалировать подповерхностный сток, в другом наборе данных примерно такой же гидрограф может быть сформирован сочетанием поверхностной и грунтовой составляющих. Таким образом, поведение модельных генетических составляющих речного стока в обоих случаях совершенно различно, хотя интегральная реакция водосбора примерно одинакова.

Для таких численных экспериментов калибровка параметров проводилась для периода 1982-1992, а валидация модели - для периода 1992-2009 г. Подобраны три различных набора

калибровочных параметров, которые дают по критерию NS (см. табл. 2) за многолетний период примерно одинаковую интегральную реакцию водосбора (суммарные гидрографы) на метеорологические воздействия, однако отражают разное соотношение для источников питания реки по генетическим составляющим. В первом варианте в среднем многолетнем суммарном стоке превалирует почвенный тип вод в сочетании с грунтовым типом и незначительной долей склонового стока (процентное соотношение почвенного, грунтового и склонового типов вод – 69%, 28% и 3% соответственно). Второй набор калибровочных параметров воспроизводит преобладание грунтового типа вод в суммарном стоке в сочетании с поверхностным склоновым и полным отсутствием внутрпочвенного стока (соответственно – 76%, 24% и 0%). И, наконец, последний вариант расчленения гидрографа на генетические составляющие с использованием третьего набора значений калибровочных параметров позволяет выделить грунтовый тип вод как доминирующий с полным отсутствием внутрпочвенного и поверхностного стока (100%, 0%, 0%). На рисунке 2 показано типовое разделение гидрографа стока по источникам питания в

Таблица 2. Значения критерия NS за периоды калибровки, валидации и весь расчетный период для трех наборов калибровочных параметров

Название гидрологического поста	1. ГТВ - 28%, ПТВ - 69%, СТВ* - 3%			2. ГТВ - 76%, ПТВ – 0%, СТВ - 24%			3. ГТВ - 100%, ПТВ – 0%, СТВ - 0%		
	1982-1992	1993-2009	1982-2009	1982-1992	1993-2009	1982-2009	1982-1992	1993-2009	1982-2009
р. Москва – д. Барсуки	0,61	0,64	0,64	0,60	0,60	0,60	0,62	0,63	0,64
р. Лусянка – д. Черники	0,53	0,65	0,60	0,54	0,58	0,57	0,54	0,57	0,57
Можайское водохранилище п. Гидроузел	0,60	0,67	0,65	0,60	0,70	0,66	0,59	0,69	0,66
NStotal	0,63	0,70	0,67	0,63	0,69	0,67	0,63	0,70	0,68

\*ГТВ – грунтовый тип вод, ПТВ – почвенный тип вод, СТВ – склоновый тип вод.

абсолютных отметках, на котором продемонстрированы особенности взаимодействия почвенного, склонового и грунтового типов вод в 1984 г. Несмотря на близость гидрографов речного стока, оценки генетических составляющих этих гидрографов кардинально отличаются. Иными словами, хорошие результаты расчета гидрографа стока могут быть получены при разных наборах параметров модели, что приводит к крайне неустойчивым оценкам генетических составляющих этого гидрографа. Это иллюстрирует известную проблему эквивалентности, и её решение требует привлечения дополнительной информации для калибровки модели и сужения диапазона изменений параметров модели.

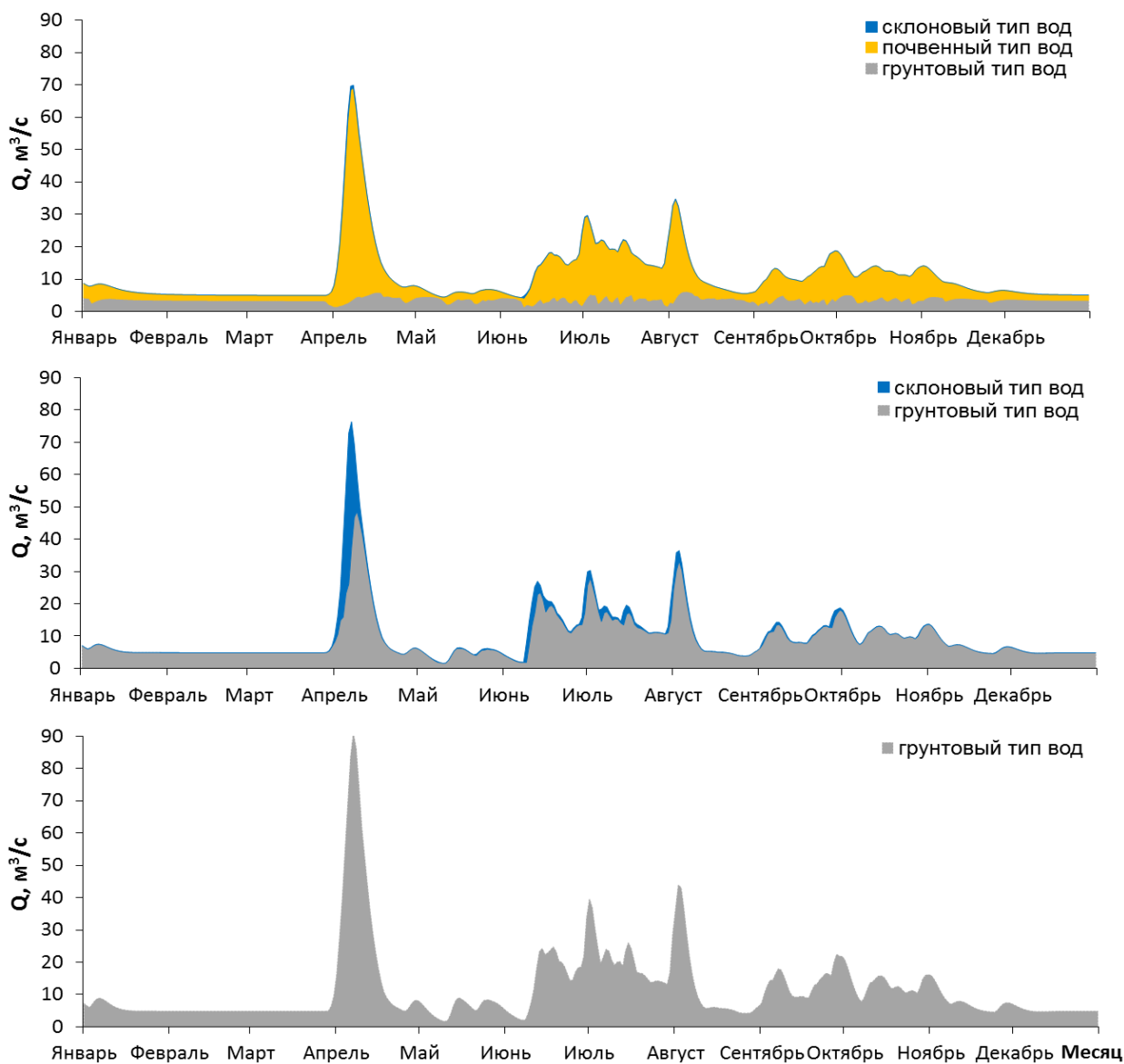


Рис. 2 Расчленение гидрографа стока на генетические составляющие при различных наборах модельных параметров на замыкающем створе Можайское вдхр - п.Гидроузел за 1984г.

**Глава 3** посвящена изложению разработанной методики калибровки параметров с целью смягчения эффекта эквивинальности и повышения идентифицируемости параметров модели при расчетах генетических составляющих речного стока и результатов проверки модели формирования речного стока с учетом гидрометеорологических и гидрохимических данных. Существует несколько подходов к расчленению гидрографа стока на генетические типы вод на основе гидрохимических исследований. Большинство из них основано на принципе баланса массы, который предполагает, что гидрохимические характеристики воды, поступающие из различных источников, постоянны и отличаются друг от друга. Такие методы являются вполне эффективными и дают достаточно большой объем информации там, где имеются данные о качестве воды. Для определения генетических составляющих стока гидрохимическим способом

используется метод П.П. Воронкова [Воронков, 1970], представляющий собой развитие графического метода расчленения гидрографа реки по данным наблюдений за внутригодовым изменением различных химических показателей. 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:

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

где  $Q$  – расход воды,  $C$  – концентрации трассеров, верхний индекс – номер трассера, нижний индекс – номер источника питания,  $Q_t$  и  $C_t$  – расход воды и концентрация трассера в реке. 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. В работе [Эдельштейн, Смахтина, 1991] 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 тому, как это делается в методе термохалинного анализа морских вод [Мамаев, 1987], широко применяемого в океанологии. При безошибочном определении в пробе пары гидрохимических характеристик, отображающие ее точки в обеих диаграммах, будут находиться в идентичной позиции. Расхождения между позициями этих точек обуславливаются погрешностью расчета генетического состава речной воды. 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 [Эдельштейн, Смахтина, 1991].

В рамках данной работы для калибровки параметров физико-математической модели ЕСОМАГ и моделирования генетических составляющих стока применяется рассмотренный выше химико-статистический метод выделения элементов генетической структуры речного

стока с использованием данных режимных гидрохимических и гидрологических наблюдений в бассейне Можайского водохранилища.

В разделе 3.1 в качестве дополнительного информационного обеспечения для проведения гидрологических расчетов по модели формирования стока привлекались 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  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  (мг/л); валового фосфора (мг/л); величины перманганатной (ПО) и бихроматной окисляемости (БО) воды (мгО/л) [Эдельштейн, Смахтина, 1991]. 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. После анализа и схематизации всех полученных данных были построены 12 возможных сочетаний пар диаграмм смешения ( $\chi$ , БО и Na, ПО;  $\chi$ , БО и Na, К;  $\chi$ , БО и Na, Р;  $\chi$ , ПО и Na, БО;  $\chi$ , ПО и Na, К;  $\chi$ , ПО и Na, Р;  $\chi$ , К и Na, БО;  $\chi$ , К и Na, ПО;  $\chi$ , К и Na, Р;  $\chi$ , Р и Na, БО;  $\chi$ , Р и Na, ПО;  $\chi$ , Р и Na, К). Оба показателя грунтовых вод использованы во всех сочетаниях, а четыре показателя почвенно-поверхностного стока – в шести сочетаниях. Пример диаграмм (треугольников) смешения сочетания рядов электропроводимости  $\chi$  и БО, Na и ПО приведен на рис. 3. На основании построенных диаграмм по формулам смешения трех водных масс был проведен сравнительный анализ полученных процентных соотношений для каждого генетического типа вод.

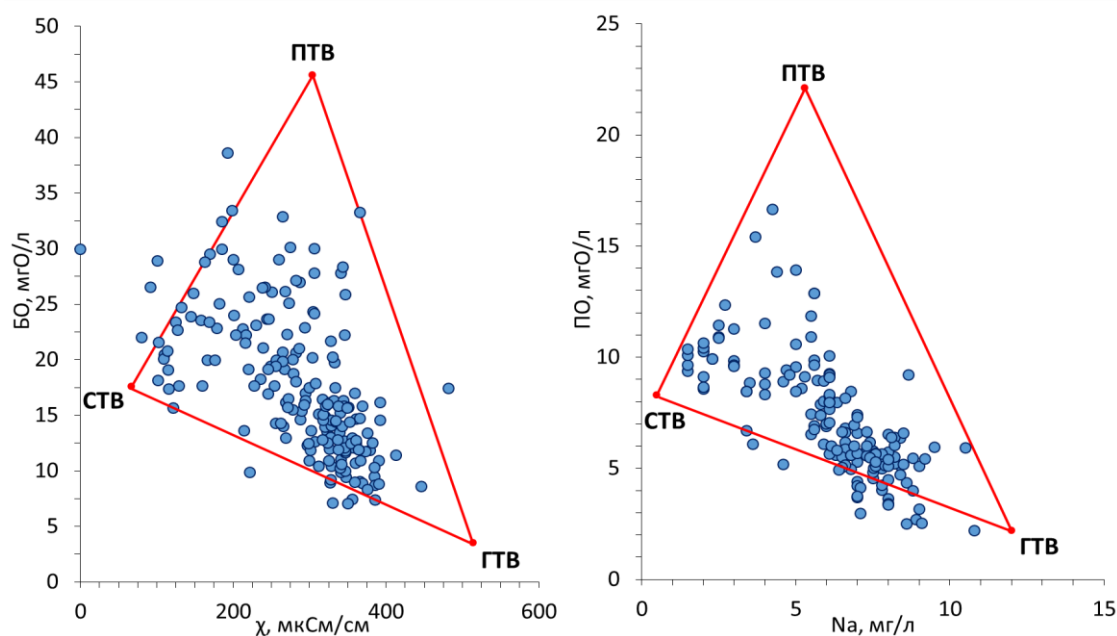


Рис. 3. Диаграммы смешения типов вод в створе р. Москва – д. Барсуки для периода 1983 – 2013 гг. (слева), для периода 1983 – 2007 гг. (справа).



В разделе 3.2 приведены результаты калибровки и проверки модели по данным о речном стоке с учетом гидрохимических данных. Калибровка параметров модели ECOMAG с учетом гидрохимических наблюдений проводилась по суточным гидрографам стока на тех же 3-х гидропостах (р. Москва – д. Барсуки, р. Лусянка – д. Черники, Можайское водохранилище – п. Гидроузел). Поскольку дополнительно для калибровки привлекались данные по процентному соотношению генетических типов вод, полученных на основе анализа гидрохимических наблюдений в створе р. Москва – д. Барсуки, периоды калибровки и валидации изменены. Помимо этого весь расчетный период был увеличен на 6 лет. Тем самым, ввиду наличия детальных гидрохимических съемок за 1984 г. калибровка выполнялась для периода 1982-1992 гг., валидация осуществлялась для периода 1993-2015 гг., а весь расчетный период составлял 1982-2015 гг. Качество моделирования среднесуточного стока оценивалось по критериям Нэша-Сатклиффа (NS) и относительной систематической погрешности (BIAS). Результаты соответствия гидрографов увеличенного расчетного ряда наблюдений можно оценить как удовлетворительные, критерий Нэша–Сатклифа находится в пределах  $0.54 < NS < 0.73$ , критерий BIAS не превышает 10.3% (табл. 3), как для калибровочной, так и для проверочной серий, а также для всего периода расчета.

Таблица 3. Значения критерия Нэша-Сатклифа и BIAS за периоды калибровки, валидации и весь расчетный период

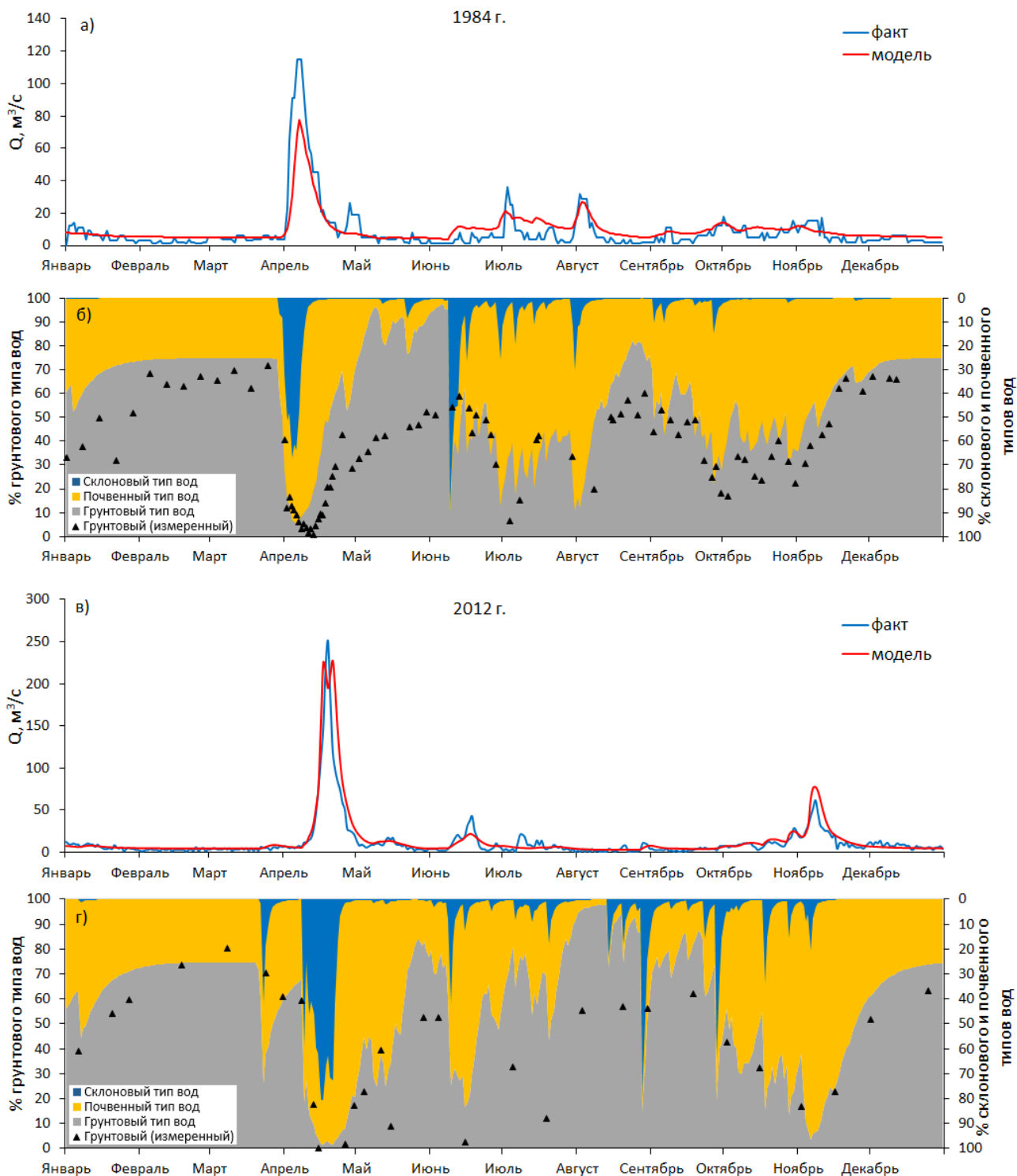
Название гидрологического поста	Период расчета											
	1982-1992				1993-2015				1982-2015			
	NS	NS <sub>total</sub>	NS <sub>mean</sub>	BIAS	NS	NS <sub>total</sub>	NS <sub>mean</sub>	BIAS	NS	NS <sub>total</sub>	NS <sub>mean</sub>	BIAS
р.Москва – д. Барсуки	0.60	0.62	0.58	-0.7	0.68	0.73	0.68	-10.3	0.66	0.70	0.65	-7.0
р.Лусянка – д. Черники	0.54			4.5	0.66			-3.6	0.62			-0.6
Можайское водохранилище-п. Гидроузел	0.60			10.0	0.72			3.6	0.68			6.0

Раздел 3.3 посвящен результатам моделирования генетических составляющих речного стока 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. 4). Из рисунков 4а, 4в 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.).

Поскольку привлекаются совершенно разнородные данные (расходы воды и гидрохимические данные), калибровка осуществлялась путем поиска компромиссного решения, доставляющего максимальную эффективность расчетов для каждого из показателей. Значение критерия Нэша–Сатклифа процентного содержания грунтовой составляющей, полученной по модели и на основе гидрохимических измерений за период калибровки расчета составляет 0.48.

На основе результатов моделирования динамики генетических составляющих стока (рис. 4б, 4г) 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 внутриводоемного 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 доли 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 небольшой и в целом невысокую точность определения типов вод химико-статистическим методом, полученные результаты можно считать вполне приемлемыми.

В **разделе 3.4** описаны выполненные автором полевые исследования по гидрохимической съемке в створе р. Москва – д. Барсуки, данные которой также использовались для верификации модели, и анализ генетических составляющих речного стока в 2019 г. Полевые исследования проводились с февраля по декабрь 2019 г., всего отобрано 54 пробы воды. Лабораторные анализы выполнялись на Ивановской научно-исследовательской станции. Полученные данные использовались для уточнения диаграмм смешения, построенных ранее.



\*грунтовой (измеренный) тип вод – полученный на основе химико-статистического метода

Рис. 4 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.

Результаты расчета генетических составляющих стока за 2019 год с помощью модели, откалиброванной с привлечением данных гидрохимических съемок 1984 и 2012 годов, можно признать удовлетворительными. Сопоставление внутригодового хода грунтовой составляющей

стока, рассчитанной по модели и определенной по гидрохимическим данным указывает на удовлетворительную точность расчетов. Большинство различий долей грунтовых составляющих не превышает 10 – 18 %.

**Глава 4** посвящена анализу применения различных методик расчленения гидрографа и выделения грунтовой составляющей речного стока и исследованию чувствительности стока и его генетических составляющих к климатическим изменениям.

В **разделе 4.1** анализируются результаты сравнения грунтовой составляющей речного стока, полученной на основе модели ECOMAG и с помощью графических методов расчленения гидрографа [Куделин, 1966; Веригин, 1963]. В связи с трудоемкостью расчленения гидрографа с помощью графических методов «вручную» сравнение грунтового стока выполнялось только за период весеннего половодья в 1984 г. Полученные величины грунтовой составляющей стока на основе модели ECOMAG, с помощью графических методов расчленения гидрографа и химико-статистического метода показывают близкие результаты расчетов.

В **разделе 4.2** проведено сравнение результатов расчетов грунтовой составляющей по модели ECOMAG и с помощью автоматизированных методов расчленения гидрографа. Во всех автоматизированных подходах использовались многолетние ряды данных о среднесуточных расходах воды. В качестве результатов получены временные ряды рассчитанного грунтового стока и индексы BFI (baseflow index). Рассчитанные величины грунтового стока сравнивались с химико-статистическим методом выделения элементов генетической структуры речного стока. На основании проведенных исследований была выделена группа методов, включающая модель ECOMAG, которые в наилучшей степени описывают грунтовый сток. Автоматизированные графоаналитические методы расчленения гидрографа, как правило, крайне чувствительны к задаваемым параметрам и могут давать сильно различающиеся результаты. Показано, что в зависимости от изменения одного из них индекс грунтового стока, полученный расчленением гидрографа, может изменяться в 2-2.5 раза. Преимущество методов физико-математического моделирования генетических составляющих речного стока по сравнению с другими подходами (натурными измерениями, методами расчленения гидрографа и др.) состоит в возможности оценки трансформации этих составляющих при изменении условий формирования стока. Такие возможности показаны далее на примере оценки чувствительности генетической структуры речного стока к климатическим изменениям.

В **разделе 4.3** чувствительность генетической структуры речного стока к климатическим изменениям была проанализирована с использованием т.н. delta-change метода, основанного на изменении многолетних рядов метеорологических наблюдений. Наблюдаемые среднесуточные значения температуры воздуха и осадков изменялись на постоянную величину – от -1°C до +2°C для температуры и от -10% до +20% для осадков. Измененные таким образом

метеорологические ряды задавались на входе модели, и результаты расчета генетических составляющих стока сравнивались с расчетами по фактическим (неизменным) метеорологическим рядам. Повышение температуры воздуха на один градус для различных сценариев изменения осадков приводит к уменьшению суммарного речного стока на 5-7% вследствие увеличения потерь стока на испарение. Максимальное снижение стока приходится на долю поверхностной составляющей (20-30%). Снижение внутриводоемной составляющей стока значительно меньше (2-6%). Грунтовая составляющая стока снижается незначительно (1-2%). Десятипроцентное увеличение осадков при различных сценариях изменения температуры воздуха приводит к увеличению рассчитанного суммарного речного стока на 15-20%. Наибольший рост прослеживается для поверхностной и внутриводоемной составляющих стока (16-28%). Грунтовый сток растет незначительно (1-2%). Однако изменяется не только многолетняя структура генетических составляющих стока, но и их сезонная динамика. При увеличении температуры на 2°C и увеличении осадков на 10% доля грунтовой составляющей в период зимней межени уменьшается, а поверхностной и внутриводоемной увеличивается. Вследствие увеличения температуры на 2°C зимой происходят более частые оттепели, поэтому суммарный сток растет в основном за счет внутриводоемной и поверхностной долей. В период весеннего половодья из-за интенсивного снеготаяния в течение зимних оттепелей доля поверхностного стока уменьшается, и отмечается более низкое половодье.

В **заключении** кратко сформулированы основные выводы диссертационного исследования:

1. Разработана физико-математическая модель формирования стока для бассейна Можайского водохранилища на базе модельного комплекса ECOMAG. Для исследования чувствительности модели к детальности задания характеристик подстилающей поверхности и наборам калибровочных параметров были разработаны гидрологические модели для трех различных вариантов детализации пространственного разрешения характеристик подстилающей поверхности: две детальные ЦМР с разрешением 50x50 м и 100x100 м (базовый вариант) и вариант с грубым разрешением с ЦМР 2x2 км. Модельные гидрографы с хорошей или удовлетворительной точностью воспроизводят наблюдаемые гидрографы суточного стока на трех гидрометрических постах на основе наблюдений на сети гидрометеорологического мониторинга за расчетный период 1982 – 2009 гг.
2. Проведены три численных эксперимента, показывающие, что при варианте калибровки параметров модели отдельно для каждого из вариантов пространственного разрешения ЦМР и других характеристик поверхности водосбора (почвы, землепользование) или при двукратном увеличении пространственного разрешения характеристик подстилающей поверхности (50x50 м) слабо влияет на результаты расчетов стока, однако при двадцатикратном уменьшении

пространственного разрешения (2x2 км) результаты моделирования могут существенно ухудшиться.

3. На основании численных экспериментов на примере моделирования генетических компонентов стока в бассейне Можайского водохранилища продемонстрирован эффект эквивалентности модели. Приведены три различных набора калибровочных параметров, которые показывают примерно одинаковую интегральную реакцию водосбора по гидрографам стока в пунктах наблюдений, но при этом отражают совершенно разное соотношение генетических составляющих речного стока.

4. С целью снижения неопределенности и эквивалентности 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. Результаты оценки качества моделирования для периодов калибровки, валидации и весь расчетный период (1982 – 2015 гг.) можно признать удовлетворительными.

5. Проведен анализ результатов моделирования генетических составляющих стока за весь период расчета. Наибольшие различия в доле грунтовой составляющей, рассчитанной по модели и определенной по гидрохимическим измерениям, достигающие 40-50%, прослеживаются в период летней межени, но в абсолютных единицах это минимальные значения, так как сток в этот период невысокий. В остальные сезоны различия находятся в пределах 10-20%. Выявлены преобладающие генетические типы вод в различные фазы водного режима и описана пространственно-временная структура речного стока.

6. Проведены полевые исследования для использования дополнительных данных и проверки модельных результатов на независимом материале. Анализ результатов моделирования за внутригодовым распределением генетических составляющих стока в течение 2019 года указывает на удовлетворительную точность расчетов по модели внутри годового хода грунтовой составляющей стока и определенной по гидрохимическим данным. Большинство различий долей грунтовых составляющих не превышает 10 – 18 %.

7. Проведено сравнение количественных оценок грунтового стока, полученных на базе модели ECOMAG, на основе предложенного химико-статистического метода и ряда других методик расчленения гидрографа (графических и автоматизированных). Количественные оценки грунтового стока модели ECOMAG при сравнении с графическими методами расчленения гидрографа и химико-статистическим методом показывают хорошую сходимость результатов расчета в период половодья. Результаты оценки годового грунтового стока при применении автоматизированных методов неоднозначны, в том числе вследствие их чувствительности к параметрам. Однако в отличие от других методов, для которых необходимо

задавать гидрографы суммарного стока, разработанная на основе ИМК ECOMAG модель позволяет рассчитать эти гидрографы по метеорологическим данным и характеристикам подстилающей поверхности, что имеет большой потенциал для использования модели в расчетах генетических составляющих речного стока в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия на речные бассейны.

8. Проведен анализ чувствительности генетических составляющих речного стока к изменениям климата на основе сценарного подхода (изменения температуры воздуха и осадков) за расчетный период 1982 – 2015 гг. Повышение годовой температуры на один градус (без изменения осадков) приводит к уменьшению суммарного речного стока, а также его поверхностной, внутриводной и грунтовой составляющих примерно на 2-10%. Десятипроцентное увеличение осадков при различных сценариях изменения температуры воздуха приводит к увеличению рассчитанного суммарного речного стока и его генетических составляющих в пределах от 2 до 26%.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Motovilov Yu.G., **Suchkova K.V.** Modeling the Genetic Components of River Runoff for the Mozhaisk Reservoir Watershed, *Water Resources*, 2018, Vol. 45, Suppl. 1, pp. S135–S145.
2. **Сучкова К.В.**, Мотовилов Ю.Г., Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В., Ерина О.Н., Соколов Д.И. Моделирование генетических составляющих речного стока с использованием гидрохимического способа идентификации водных масс // *Вода: химия и экология*. 2019. № 1-2, С. 46-56.
3. **Suchkova K.V.**, Motovilov Yu.G. Sensitivity Assessment of a Runoff Formation Model in the Mozhaisk Reservoir River Basin, *Water Resources*, 2019, Vol. 46, Suppl. 2, pp. S40–S50.

### *Публикации в других изданиях:*

4. **Сучкова К.В.** Оценка чувствительности генетических составляющих речного стока к изменениям климата // *Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. Сборник тезисов Международной научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 22-24 октября 2020 г.)*. Российский государственный гидрометеорологический университет (Санкт-Петербург), 2020. С. 424 – 425.
5. **Сучкова К.В.** Моделирование и гидрохимическая идентификация составляющих речного стока // *Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Нижний Новгород, 08-14 сентября 2019 г.)*. Москва: Студия Ф1, 2019. С 453 – 458.
6. **Suchkova K.V.**, Motovilov Y.G. Modeling the genetic components of river runoff using water chemistry data // *The 27th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly 2019. Session H05 «Tracers For Understanding the Sources, Pathways and Fate Of Pollutants in the Hydrological Cycle» (Montréal, Canada, 2019)*, Abstract number: IUGG19-3004.
7. **Сучкова К.В.** Использование гидрохимического способа идентификации водных масс для моделирования генетических составляющих речного стока (на примере Можайского водохранилища) // *Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 30 мая – 2 июня 2019 г.): в 3 т. Т. 3: Управление водными ресурсами. Гидробиология и ихтиология. Вопросы гидрологии и гидроэкологии (секция молодых ученых)*. Пермс. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь. 2019. С. 217 – 222.
8. **Сучкова К.В.** Моделирование генетических составляющих речного стока для водосбора Можайского водохранилища // *Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции «Волга и ее жизнь». Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок, 22–26 октября 2018 г.*, место издания Филигрань Ярославль, тезисы, с. 129.