

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

на правах рукописи

КАЛУГИН АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕКИ АМУР И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНОГО РЕЖИМА**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата географических наук

специальность 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. А.Н. Гельфан

Научный соруководитель:

к.г.н. Ю.Г. Мотовилов

Москва – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Изменения климата и речного стока в бассейне р. Амур: обзор существующих оценок по данным наблюдений и результатам моделирования.....</b>	<b>10</b>
1.1 Физико-географическая, климатическая и гидрологическая характеристики бассейна.....	10
1.2 Обзор существующих оценок изменений климата и речного стока в бассейне Амура по данным гидрометеорологических наблюдений.....	23
1.2.1 Оценки изменений климата в бассейне р. Амур по данным наблюдений.....	23
1.2.2 Оценки природных и антропогенных изменений речного стока в бассейне р. Амур за период наблюдений.....	26
1.3 Обзор существующих методов моделирования речного стока и возможных изменений водного режима в бассейне р. Амур.....	28
<b>Глава 2. Разработка модели формирования стока р. Амур.....</b>	<b>33</b>
2.1 Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG: описание структуры и требований к исходным данным.....	33
2.2 Создание баз исходной информации для модели формирования речного стока в бассейне р. Амур.....	40
2.3 Разработка модели формирования стока р. Амур: оценка параметров, калибровка и проверка модели.....	43
2.3.1 Оценка параметров модели формирования стока по информации из глобальных баз данных о характеристиках бассейна р. Амур.....	43
2.3.2 Калибровка и проверка модели по данным о речном стоке в различных створах речной сети.....	51
2.4 Пространственно-временной анализ условий формирования наводнения 2013 г. в бассейне р. Амур по результатам моделирования.....	65
<b>Глава 3. Применение модели формирования стока для сценарных оценок противопаводкового эффекта действующих и проектируемых водохранилищ в бассейне р. Амур.....</b>	<b>79</b>
3.1 Оценка противопаводкового эффекта Зейского и Бурейского водохранилищ в период прохождения экстраординарного паводка 2013 года на основе комплекса физико-математических моделей.....	81

3.2 Оценка противопаводкового эффекта проектируемых Селемджинского, Нижне-Зейского и строящегося Нижне-Бурейского водохранилищ на основе модели формирования стока в бассейнах рек Зеи и Буреи и одномерной гидродинамической модели движения паводковой волны.....	94
<b>Глава 4. Оценка возможных изменений стока р. Амур на основе численных экспериментов с моделью его формирования и глобальными моделями климата.....</b>	<b>106</b>
4.1 Оценка чувствительности многолетних характеристик стока р. Амур к изменению климатических параметров.....	108
4.2 Моделирование стока р. Амур за исторический период при использовании данных расчетов по глобальным моделям климата.....	118
4.3 Оценка возможных изменений климата и моделирование характеристик стока в бассейне р. Амур в XXI веке.....	137
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>156</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>158</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>171</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>178</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Разработка физико-математической модели формирования стока для речного бассейна субконтинентального масштаба, адекватно описывающей пространственную неоднородность физико-географических, климатических условий, разнообразие физических механизмов стокообразования на огромной территории, антропогенные изменения водного режима рек – сложнейшая проблема гидрологии суши, возможности решения которой расширились за последние годы с развитием методов математического моделирования и численных методов, технологий измерения, хранения и обработки исходных данных, их усвоения моделями, развитием вычислительных ресурсов. Значимость этой проблемы для гидрологии, как геофизической дисциплины, определяется той ролью, которую играет гидрологический цикл крупнейших речных бассейнов в глобальном водообмене и динамике климатической системы, во взаимодействии вод суши с океаном.

Для крупных речных бассейнов России построение модели формирования речного стока нередко усложняется вследствие дефицита исходных данных о характеристиках почв, рельефа, растительности, данных гидрометеорологических наблюдений, водохозяйственной информации. Бассейн реки Амур – одной из крупнейших рек Земного шара – располагается на территории трех государств, что существенно усложняет проблему построения региональной гидрологической модели и обеспечения ее однородными данными гидрометеорологического и водохозяйственного мониторинга. Эти трудности, в значительной степени, стали причиной того, что накопленный за последние годы опыт гидрологического моделирования формирования речного стока в бассейне Амура ограничивается разработкой моделей частных водосборов или отдельных гидрологических процессов (В.В. Беликов, А.Н. Бугаец, Д.А. Бураков, Б.И. Гарцман, Ю.Г. Мотовилов и др.) и применением разработанных моделей для решения актуальных прикладных задач (Н.И. Алексеевский, М.В. Болгов, С.В. Борщ, В.Ю. Георгиевский, В.И. Данилов-Данильян, Н.Л. Фролова и др.). Имеется также опыт использования глобальных гидрологических моделей для оценки характеристик водного режима бассейна Амура в целом (И.А. Шикломанов, Werth, Yang и др.), однако эффективность глобальных моделей сильно ограничена принятыми упрощениями, и возможности их применения для гидрологических задач на масштабах времени меньше климатических не очевидны. Проблема разработки региональной гидрологической модели бассейна Амура стала особенно актуальной после экстраординарного наводнения 2013 г., формирование которого явилось результатом масштабных гидрометеорологических процессов, охвативших практически весь бассейн. Катастрофические последствия этого наводнения обострили необходимость анализа взаимосвязанных гидрометеорологических процессов на огромной



территории бассейна Амура в связи с недостатком или отсутствием данных наблюдений за стокообразующими факторами и режимом стока рек, с оценкой влияния климатических изменений на перестройку атмосферных процессов и возможный рост повторяемости выдающихся дождевых паводков в этом регионе, с необходимостью создания надежных инструментов оценки противопаводковой роли действующих водохранилищ, анализа эффективности планируемых мероприятий по защите населения и объектов экономики от будущих наводнений в бассейне Амура. Перспективы эффективного решения соответствующих научных и практических задач заключаются, в значительной мере, в возможности построения модели формирования речного стока для всего бассейна р. Амур.

#### **Цели работы:**

- разработка физико-математической модели формирования речного стока с использованием глобальных баз данных о характеристиках бассейна, описывающей пространственно-временную изменчивость гидрологических процессов на всей территории бассейна р. Амур по стандартным данным метеорологического и водохозяйственного мониторинга;
- применение разработанной региональной модели для анализа условий формирования экстраординарного паводка 2013 г., оценки противопаводкового эффекта действующих и проектируемых водохранилищ на Среднем Амуре при разных гидрометеорологических условиях в речном бассейне;
- разработка методов оценки возможных гидрологических последствий прогнозируемых изменений климата на основе численных экспериментов с региональной гидрологической и глобальными климатическими моделями.

**Объект и исходные материалы исследований.** Объектом изучения являются реки бассейна Амура. При проведении исследований использовались архивные данные гидрометеорологического мониторинга для российской и китайской части бассейна, данные водохозяйственного мониторинга для российской территории и ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, глобальные базы данных о характеристиках подстилающей поверхности бассейна разрешения 1 км, данные расчетов глобальных моделей климата. Моделирование формирования речного стока выполнялось с использованием информационно-моделирующего комплекса ECOMAG. Статистическая обработка модельных расчетов проводилась с использованием стандартных средств Microsoft Excel и Statistica. Приведенные в диссертации карты построены в среде ArcGIS 9.3.

#### **Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Впервые разработана и апробирована по многолетним данным наблюдений региональная модель формирования речного стока для всего бассейна р. Амур, учитывающая пространственную неоднородность характеристик водосбора, влияние водохранилищ и

позволяющая описать гидрологические процессы (накопление и таяние снега, испарение, вертикальный тепло- и влагоперенос в ненасыщенной зоне почвы, горизонтальное движение воды по склонам водосбора, подповерхностный и грунтовый сток, неустановившееся движение воды в речной системе) с пространственным разрешением порядка 900 км<sup>2</sup> и временным разрешением 1 сутки по данным стандартного метеорологического и водохозяйственного мониторинга;

2. Предложены и апробированы методы задания параметров модели формирования стока в бассейне Амура с использованием глобальных баз данных о характеристиках рельефа, почв и землепользования;
3. Впервые показаны возможности воспроизведения с помощью региональной модели формирования речного стока многолетних рядов среднесуточных расходов воды в различных створах основного русла р. Амур и ее притоков по данным стандартных метеорологических наблюдений и водохозяйственного мониторинга;
4. Впервые показаны возможности региональной модели формирования речного стока в бассейне р. Амур для анализа условий формирования экстраординарного паводка 2013 года, оценки противопаводкового эффекта действующих (Зейского, Бурейского) и проектируемых (Селемджинского, Нижне-Зейского) водохранилищ на Среднем Амуре при разных сценариях гидрометеорологических условий в речном бассейне;
5. Впервые исследованы возможности региональной модели формирования речного стока для оценки многолетних характеристик водного режима р. Амур за период наблюдений с использованием в качестве входных данных результатов ансамблевых расчетов глобальных климатических моделей;
6. Впервые показаны возможности региональной гидрологической модели бассейна р. Амур для оценки возможных гидрологических последствий прогнозируемых изменений климата с использованием результатов ансамблевых расчетов глобальных климатических моделей.

**Практическая значимость проведенных исследований** заключается:

- в разработке и апробации региональной модели формирования речного стока в бассейне р. Амур, позволяющей с удовлетворительной точностью рассчитать гидрографы суточного стока в основном русле и на притоках за многолетний период, смоделировать пространственное распределение характеристик снежного покрова, влажности почвы, испарения и других характеристик водного режима на всей территории бассейна и его частных водосборах по данным стандартного метеорологического и водохозяйственного мониторинга;
- в создании для всего бассейна р. Амур (включая территории сопредельных государств) архивов многолетних гидрологических и метеорологических данных суточного разрешения,

архивов водохозяйственных данных, баз пространственно-распределенных данных о характеристиках рельефа, почв, землепользования, а также архивов метеорологических характеристик (входных данных в разработанную региональную модель формирования речного стока), рассчитанных по ансамблю глобальных климатических моделей;

- в разработке и апробации технологий сценарных оценок противопаводкового эффекта действующих (Зейского, Бурейского) и проектируемых (Селемджинского, Нижне-Зейского) водохранилищ на Среднем Амуре. Созданные при участии автора методические разработки были использованы при выполнении проекта «Разработка технологии гидроинформационной поддержки принятия решений по инженерной защите селитебных территорий в бассейне реки Амур» в Институте водных проблем РАН по заказу Научно-исследовательского института энергетических сооружений ПАО «РусГидро»;
- в создании и апробации технологий оценки и анализа значимости возможных изменений водного режима р. Амур в XXI веке с помощью разработанной региональной модели формирования стока и с использованием климатических проекций, рассчитанных по ансамблю глобальных моделей климата при разных сценариях радиационного воздействия.

#### **Защищаемые положения:**

1. Разработана первая модель формирования стока для всего водосбора р. Амур, позволяющая описывать с суточным шагом по времени водный режим основных рек, пространственное распределение характеристик снежного покрова, влажности почвы, испарения и других составляющих гидрологического цикла речного бассейна и его частей по данным стандартного метеорологического и водохозяйственного мониторинга.
2. Получены удовлетворительные результаты проверки модели формирования стока в бассейне р. Амур по многолетним данным наблюдений водного режима в различных створах речной сети, включая данные наблюдений в период прохождения экстраординарного паводка 2013 г.
3. Разработанная модель формирования стока р. Амур может служить эффективным инструментом оценки противопаводкового эффекта действующих и проектируемых водохранилищ на Среднем Амуре при задании разных сценариев гидрометеорологических условий на водосборе, включая условия формирования паводка 2013 г.
4. Разработанная модель формирования стока р. Амур при использовании данных ансамблевых расчетов глобальных климатических моделей позволяет получить физически обоснованные оценки возможных изменений многолетних характеристик водного режима р. Амур в XXI веке.

**Обоснованность и достоверность результатов работы.** Все результаты работы были получены автором и при его непосредственном участии с учетом основных достижений мировой науки в рассматриваемой области. Результаты расчетов по модели формирования

речного стока и гидродинамической модели были проверены на материалах наблюдений, полученных в надежных источниках (ВНИИГМИ-МЦД, данные гидрологического и водохозяйственного мониторинга Росводресурсов, глобальные базы данных). Методики, использованные для проверки надежности расчетов, являются принятыми к использованию в научном сообществе.

**Личный вклад автора.** Использованный в работе информационно-моделирующий комплекс ECOMAG был разработан ранее соруководителем диссертационной работы Ю.Г. Мотовиловым в Институте водных проблем РАН. Разработка модели формирования стока для всего бассейна р. Амур, создание для всего бассейна р. Амур (включая территории сопредельных государств) архивов многолетних гидрометеорологических и водохозяйственных данных суточного разрешения, пространственно-распределенных данных о характеристиках бассейна, калибровка и верификация модели формирования стока по данным наблюдений, пространственно-временной анализ условий формирования наводнения 2013 г. по результатам моделирования, разработка гидродинамической модели неустановившегося движения воды на Среднем Амуре, проведение и обработка результатов численных экспериментов по оценке противопаводковой функции водохранилищ и гидрологических последствий изменения климата в бассейне Амура – все это сделано лично автором диссертационной работы.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих российских и зарубежных конференциях: Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза (Австрия, г. Вена, 2014), Открытая научная конференция Комплексного регионального исследования Азиатского муссона «Будущее Земли в Азии» (КНР, г. Пекин, 2014), XXVI Генеральная ассамблея Международного союза геодезии и геофизики (Чехия, г. Прага, 2015), Всероссийская научная конференция «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз» (Туапсе, 2013), Международная конференция и школа-семинар для молодых ученых и аспирантов им. Ю.Б. Виноградова «Первые Виноградовские чтения. Будущее гидрологии» (Санкт-Петербург, 2013), VII Всероссийский гидрологический съезд, секция «Моделирование гидрологического цикла» (Санкт-Петербург, 2013), IX Общероссийская конференция изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2013), Всероссийская научная конференция «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» (Петрозаводск, 2015), Международная конференция и школа-семинар для молодых ученых и аспирантов им. Ю.Б. Виноградова «Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии» (Санкт-Петербург, 2015), IX международная научная конференция молодых ученых и талантливых студентов

«Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 2015), II Международная конференция «Science of the Future» (Казань, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 5 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из 4 глав, введения, заключения и 2 приложений. Объем работы составляет 185 страниц, включая 134 рисунка и 23 таблицы. Библиографический список содержит 141 наименование.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю и соруководителю, а также всем сотрудникам лаборатории гидрологии речных бассейнов за конструктивные советы при подготовке диссертации. Я благодарю супругу за поддержку в период работы над диссертацией и посвящаю ее своей маме.

# Глава 1. Изменения климата и речного стока в бассейне р. Амур: обзор существующих оценок по данным наблюдений и результатам моделирования

## 1.1 Физико-географическая, климатическая и гидрологическая характеристики бассейна

Приведенное ниже описание физико-географических, климатических и гидрологических характеристик бассейна р. Амур дано по работам [Ресурсы поверхностных вод СССР, 1970; Информационный бюллетень ..., 2011; «Реки и озера мира», 2012; Сводный том СКИОВО..., 2013], а также по монографиям и статьям, ссылки на которые даны в тексте.

Амур – одна из крупнейших рек мира. Общая площадь водосбора р. Амур составляет 1855 тыс. км<sup>2</sup> (десятый по размеру речной бассейн в мире), в том числе в пределах Российской Федерации – 1003 тыс. км<sup>2</sup>, КНР – 820 тыс. км<sup>2</sup> и Монголии – 32 тыс. км<sup>2</sup>. Бассейн Амура расположен между 42 и 56° с.ш., 108° и 142° в.д. Амур образуется слиянием рек Шилки и Аргуни, протекает преимущественно в широтном направлении с запада на восток и впадает в Амурский лиман Татарского пролива (Рисунок 1.1). Таким образом, река принадлежит к бассейну Тихого океана. Длина р. Амур от слияния Шилки и Аргуни 2824 км, от истока р. Аргунь – 4444 км.

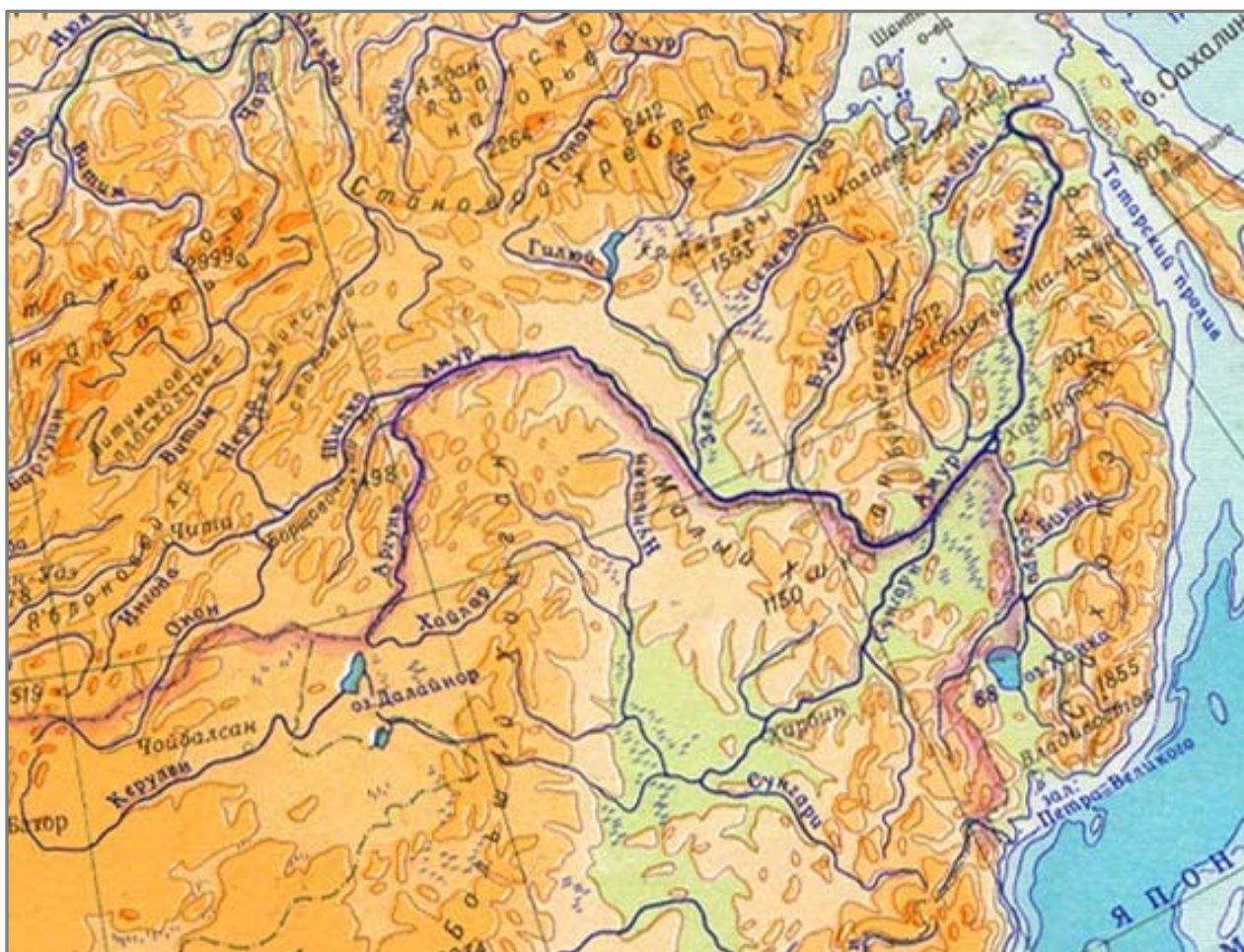


Рисунок 1.1 – Физико-географическая карта района исследования

Водосборную площадь ограничивают хребты Становой, Яблоновый, Черского, Тукурингра-Джагды, Буреинский, Сихотэ-Алиньский, Большой Хинган и Малый Хинган. Наиболее крупными равнинами являются Зейско-Буреинская, Сун-Ляо, Средне-Амурская, Приханкайская.

Бассейн Амура в геоморфологическом отношении представляет собой чередование горных хребтов, ориентированных, в основном, в северо-восточном направлении, и межгорных впадин, разделяющих хребты (в Забайкалье) или являющихся самостоятельными морфоструктурами (Амуро-Зейская и Зейско-Буреинская равнины, Средне-Амурская и Эворон-Чукчагирская низменности, равнина Дунбэй). Рельеф гористой части бассейна низкогорный, лишь верховья рек – притоков Зеи, Селемджи, Буреи, Уссури начинаются в среднегорьях на высотах 2000-2500 м над уровнем моря. В целом горный рельеф занимает около 80% бассейна Амура со средними высотами до 1000 м.

Горная часть бассейна сложена скальными породами: интрузиями палеозоя и мезозоя и сильно деформированными осадочными породами мезозоя. Межгорные впадины представляют собой грабены, определяющие ящикообразную линейную форму впадин. Плоские днища впадин сложены аллювиальными, пролювиальными и склоновыми отложениями – галечниками, песками, реже – супесями. Амурско-Зейская и Зейско-Буреинская равнины сложены древнеаллювиальными песками и галечниками, делювиально-пролювиальными глинисто-обломочными породами, Средне-Амурская и другие низменности – аллювиальными и озерно-болотными отложениями – песками, торфяниками.

В бассейне Амура в географии распространения типов ландшафтов и почвенного покрова наибольшую роль играет рельеф и высотная поясность. В бассейне Амура представлены четыре физико-географические зоны: лесная, лесостепь, степь и полупустыня.

В бассейне Верхнего Амура преобладают южнотаежные леса – равнинные или низкогорные; в пределах Зейско-Буреинской равнины – широколиственные леса, заметно видоизмененные человеком, особенно на правобережье (в Китае) – здесь долина и склоны распаханы или заняты селениями и городами. В отрогах Малого Хингана развиты кедрово-широколиственные леса. В пределах Средне-Амурской низменности в долине преобладают широколиственные леса, которые чередуются с гидроморфными ландшафтами болот на низменной аллювиальной равнине. Ниже г. Хабаровска широколиственные леса сменяются подтаежными смешанными лесами. Ниже г. Комсомольска-на-Амуре распространена темнохвойная тайга.

Средняя часть бассейна характеризуется как лесостепь, переходящая к югу в степь и сухую степь монгольского типа. Зона лесостепей простирается от северо-западной части бассейна через всю центральную, за исключением возвышенной части хребта Большой Хинган.

Степные ландшафты характерны на монгольской части бассейна. Растительность в основном представлена злаково-разнотравным покровом. Полупустынная зона расположена в бассейне р. Сунгари.

Почвенный покров горных хребтов в северной, восточной, а также центральной возвышенной части бассейна представлен преимущественно буроземами с разделением на буроземы глееватые и глеевые, буроземы грубогумусовые и буроземы слабонасыщенные оподзоленные, а также встречаются горные луговые и щебнистые почвы. В юго-западной равнинной части бассейна распространены темнокаштановые почвы. Равнинные зоны южной и центральной части бассейна заняты преимущественно лугово-черноземными, черноземными и подзолисто-глееватыми почвами, которые приурочены, как правило, к долинам крупных рек, а верховья р. Зеи – арктическими глееземами. В юго-восточной части бассейна почвы представлены в основном оподзоленными желтоземами.

В северной и восточной частях бассейна Амура в районах с абсолютными отметками более 1000 м распространены многолетнемерзлые горные породы мощностью от 50 до 150 м. В низкогорных районах высотой менее 1000 м наблюдается прерывистое распространение многолетнемерзлых пород. Однако на большей части территории бассейна Амура преимущественно распространены островные и редкоостровные многолетнемерзлые породы, а в южной и юго-восточной частях они отсутствуют. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород на данной территории составляет от  $-1$  до  $-5$  °С. Сезонное протаивание обычно начинается в мае и заканчивается в октябре.

Бассейн Амура расположен в зоне умеренного климата с ярко выраженным муссонным характером циркуляции атмосферы и циклонической деятельностью. Характерные черты муссонного климата: преобладание летних осадков, смягчающих континентальность климата в направлении с запада на восток от верхнего течения реки к нижнему. Температура января на Верхнем Амуре  $-30 \div -32$ °С, на Среднем  $-24 \div -28$ °С, на Нижнем  $-20 \div -24$ °С; минимальная зимняя температура  $-42$ °С на Верхнем Амуре,  $-38$ °С на среднем и нижнем течении, а число дней с морозами ниже  $-30$ °С уменьшается вниз по течению от 80 до 20. Температура июля на Верхнем Амуре  $18$ °С, на Среднем, в самой южной части бассейна, достигает максимальных для Амура значений  $20 \div 24$ °, а в нижней, более северной части бассейна снижается до  $16 \div 18$ °С.

Годовое количество осадков возрастает от 400 мм на Верхнем Амуре до 600 мм на Среднем и вновь снижается до 500 мм в низовьях, что связано с его наиболее северным положением. В горных районах и на побережье годовые величины осадков могут достигать 700-1200 мм. Осадки в течение года распределяются неравномерно – до 70% выпадает летом, в июле–августе. Максимальная повторяемость и количество летних осадков отмечается в среднем течении реки. Минимальное количество осадков выпадает в январе (10 мм), что



связано с антициклональным режимом погоды. В настоящее время отмечается слабое увеличение зимних температур при постоянстве летних и среднегодового и сезонного количества осадков. Несмотря на малое количество зимних осадков, высота снежного покрова на Верхнем и Нижнем Амуре превышает 150 см, на Среднем Амуре 130 см. Среднегодовое испарение составляет около 300 мм, т.е. водный баланс территории положительный.

Исходя из орографии долины и водоносности реки, выделяют три основных участка: Верхний Амур от слияния Шилки и Аргуни до впадения р. Зеи протяженностью 883 км, Средний Амур от г. Благовещенск до г. Хабаровск (975 км), Нижний Амур от Хабаровска до устья (966 км). На участке Среднего Амуре впадают основные притоки: левые Зея и Бурея, правые Сунгари и Уссури.

Река Зея – второй по водности приток Амуре (после Сунгари) берет начало на южном склоне Станового хребта на высоте около 2000 м и впадает в р. Амур у г. Благовещенска в 1936 км от устья. Длина реки составляет 1242 км, площадь водосбора – 233 тыс. км<sup>2</sup>. По площади водосбора р. Амур у г. Благовещенска более чем в два раза превосходит р. Зею, но по водности уступает (средний многолетний расход Амуре у города составляет 1610 м<sup>3</sup>/с, Зеи в устье – 1910 м<sup>3</sup>/с).

Река Бурея образуется слиянием рек Правая и Левая Бурея, стекающих с юго-западных отрогов хребтов Эзоп и Дуссе-Алинь, и впадает в Амур в 1666 км от устья. Длина реки составляет 623 км, площадь водосбора – 70.7 тыс. км<sup>2</sup>.

Реке Сунгари по годовому стоку (2130 м<sup>3</sup>/с) принадлежит первое место среди основных притоков Амуре, а ее годовой сток в створе Амуре у г. Хабаровска составляет четвертую часть. Длина р. Сунгари – 1865 км, площадь водосбора – 532 тыс. км<sup>2</sup>.

Река Уссури берет исток на склонах хребта Сихотэ-Алинь и впадает в протоку Амурская в 996 км от устья р. Амур. Длина реки составляет 897 км, площадь водосбора – 193 тыс. км<sup>2</sup> (в пределах РФ – 136 тыс. км<sup>2</sup>).

#### *Гидрологическая изученность и основные характеристики водного режима рек бассейна Амуре*

Инструментальные наблюдения на р. Амур начались в 1896 г. На государственной гидрологической наблюдательной сети расходы воды на российской части бассейна Амуре измеряются на 178 постах (5590 км<sup>2</sup> на пост) [Фролов, Георгиевский, 2014]. Для 138 гидрологических постов имеются ряды наблюдений длительностью более 80 лет. В настоящее время на основном русле Амуре выше Хабаровска расходы не измеряются.

Наблюдения за режимом водных объектов Амурского бассейна осуществляются на 273 пунктах сети мониторинга Росгидромета, что соответствует плотности гидрометрической сети 3670 км<sup>2</sup> на пункт наблюдений [Дугина, Гаврилов, 2014]. Большая часть имеющегося на

сегодняшний день массива данных представлена результатами наблюдений за уровнями воды.

В настоящее время в Забайкальском крае наблюдения за гидрологическим режимом водных объектов проводятся в 78 пунктах, в Амурской области – в 61, в Хабаровском крае – в 57, в ЕАО – в 20, в Приморском крае – в 49 пунктах. Наиболее изученными реками в области стокового режима являются Аргунь, Онон, Ингода, Бира, Горин, Уссури, Хор, Большая Уссурка.

В таблице 1.1.1 приведен перечень действующих гидрологических постов на р. Амур и расположенных в приустьевой области ее крупных притоков.

Таблица 1.1.1 – Список гидрологических постов на р. Амур и расположенных в приустьевой области ее крупных притоков

№	Река	Местоположение поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Отметка нуля поста, м БС	Год открытия
1	Амур	с. Покровка	2820	370	301.99	1896
2	Амур	с. Джалинда	2618	406	250.94	1912
3	Амур	с. Черняево	2388	440	199.53	1894
4	Амур	с. Кумара	2168	478	160.53	1896
5	Амур	с. Сергеевка	2015	488	133.18	1934
6	Амур	г. Благовещенск	1941	493	119.88	1895
7	Амур	с. Гродеково	1921	726	114.63	1912
8	Амур	с. Константиновка	1831	734	107.64	1934
9	Амур, протока Поярковская	с. Поярково	1773	741	101.90	1896
10	Амур	с. Иннокентьевка	1641	837	87.52	1896
11	Амур	с. Пашково	1533	856	72.50	1937
12	Амур	с. Екатерино-Никольское	1366	864	56.62	1896
13	Амур	с. Нагибово	1313	867	50.88	1934
14	Амур	с. Ленинск	1190	1410	42.94	1896
15	Амур, протока Нижнеспасская	с. Нижнеспасское	1012	1440	34.11	1934
16	Амур, протока Амурская	с. Казакевичево	1004	1630	27.88	1934
17	Амур	г. Хабаровск	966	1630	30.69	1895

18	Амур	г. Хабаровск (г.ст.)	962	1630	24.10	1938
19	Амур	с. Елабуга	875	1670	25.49	1934
20	Амур	с. Троицкое	770	1690	20.52	1932
21	Амур	с. Малмыж	707	1700	16.89	1932
22	Амур	г. Комсомольск	614	1730	12.93	1932
23	Амур	с. Нижнетамбовское	514	1750	8.18	1914
24	Амур	с. Циммермановка	407	1760	5.11	1934
25	Амур, протока Мариинская	с. Мариинское	326	1770	3.33	1900
26	Амур	с. Богородское	238	1790	1.36	1932
27	Амур	с. Тахта	123	1850	-2.10	1937
28	Амур	г. Николаевск	48	1850	-1.10	1900
29	Зея	с. Белогорье	43	229	123.97	1932
30	Бурея	с. Малиновка	80	67.4	106.43	1910
31	Сунгари	г. Цзямусы	270	528	44.35	1939

По водному режиму реки бассейна Амура относится к дальневосточному типу, характерной чертой которого является хорошо выраженное преобладание дождевого стока. В годы различной водности дождевой сток составляет 60–80% годового стока. На сток, обусловленный снеговым питанием, приходится 10–20%, на подземный сток также 10–20%. Соотношение источников питания рек в каждом отдельном случае определяется географическим положением водосбора. При этом существенное значение имеют его высота, наличие многолетней мерзлоты, характер почвенного и растительного покрова.

Водный режим Амура формируется при сложении паводков на его притоках. В разных частях бассейна Амура летние дождевые паводки могут проходить в разное время. Паводочный период в западной части района начинается в конце мая–начале июня, в восточной – в мае, причем в северных районах он наступает на 15–20 суток позже, чем в южных. Длится паводочный период в среднем от 140–170 суток (в восточных и южных районах) до 110–150 суток (в северных и западных районах). В основном паводки наблюдаются в июле–сентябре. На паводочный период приходится большая часть годового стока. Паводки на притоках Амура представляют собой хорошо выраженные подъемы воды в виде одиночных или многовершинных пиков, разделенных между собой периодами относительно низких уровней продолжительностью от нескольких до 10 суток и более.

В результате для самого Амура характерен единый паводковый период, продолжающийся в течение 5-6 месяцев. Количество дождевых паводков в это время

изменяется от года к году, в зависимости от условий проникновения муссонов на территорию бассейна. В среднем за летне-осенний период крупных дождевых паводков наблюдается от 3 до 8. Ширина зоны затопления при высоких паводках достигает в пределах Средне-Амурской низменности на Среднем Амуре 15 км, на Нижнем 20 км.

Другой отличительной чертой водного режима рек является снеговое половодье. Весеннее половодье в бассейне Верхнего и Среднего Амура в среднем длится 20–30 дней, в бассейне Нижнего Амура – от 30 до 50 дней. Обычно оно начинается в первой половине апреля и заканчивается во второй половине мая. Интенсивность подъема уровней воды во время половодья меньше, чем в периоды прохождения дождевых паводков.

Весенние максимумы наблюдаются примерно с 20 апреля по 10 мая. На малых реках наиболее высокая волна половодья проходит несколько раньше, чем на больших и средних реках (разница в среднем составляет 5–10 суток). Спад половодья по сравнению с подъемом более продолжителен. Наименьшая доля стока весеннего половодья в годовом стоке (5–10%) наблюдается в западной части бассейна, наибольшая (20–30%) – на реках бассейнов Зеи и Буреи.

Расчленив весеннее половодье по источникам питания часто бывает затруднительно, так как оно либо плавно переходит в сезон дождевых паводков, либо приобретает смешанный характер, когда помимо талых снеговых вод в его формировании принимают участие дождевые воды. В отдельные годы имеют место случаи, когда во время весеннего половодья наибольшие расходы воды на некоторых реках превышают летние максимумы дождевого происхождения. Это наблюдается при дружной весне, повышенных снегозапасах на речных водосборах, интенсивных дождях, выпадающих в это время, а также в годы, когда летние муссоны не проявляют обычной активности.

Летняя межень как таковая на реках бассейна не выражена, только отдельные периоды пониженной водности наблюдаются между прохождением паводков. Осенняя межень, в связи с уменьшением количества осадков, связана с переходом рек на грунтовое питание. Доля осеннего стока на некоторых реках, несмотря на это, может достигать 20% от годового. Зимой сток рек уменьшается вследствие прекращения поверхностного питания и истощения запаса грунтовых вод.

Появление первых ледовых образований на реках Амурского бассейна изменяется по широте. На западе бассейна и на Верхнем Амуре начало первых ледовых явлений приходится на первую – вторую декаду октября, на Среднем и Нижнем Амуре – на третью декаду октября – начало ноября. Малоснежные и достаточно суровые зимы приводят к формированию значительного по толщине ледяного покрова на крупных реках, вплоть до полного промерзания малых рек. Очищение ото льда наблюдается обычно в мае. При этом вскрытие в верхнем

течении Амура приходится на первую декаду, в низовьях – на третью декаду мая. Иногда прохождение весеннего ледохода сопровождается образованием заторов.

Среднегодовое годовое модуль стока р. Амур равен  $6.1 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$ , что соответствует расходу воды в устье  $11330 \text{ м}^3/\text{с}$  или  $357 \text{ км}^3/\text{год}$ . Объем стока с территории сопредельных стран (КНР и Монголии) в сумме составляет 28% (табл. 1.1.2). В монографии И.А. Шикломанова [Водные ресурсы России..., 2008] приводится значение среднегодового объема стока р. Амур в створе с. Богородское  $341 \text{ км}^3$  за период наблюдений 1930-2005 гг. при изменчивости годового стока  $C_v=0.2$ . При этом годовое стока Амура в 2013 г. был наибольшим –  $445 \text{ км}^3$ , а в экстремальное маловодье 2008 г. самым низким за период инструментальных наблюдений –  $131 \text{ км}^3$ . Таким образом, межгодовая амплитуда годовых объемов стока Амура составила  $314 \text{ км}^3$  [Георгиевский, 2014]. Среднегодовые годовые объемы стока воды Амура и его основных притоков за различные периоды приведены в таблицах 1.1.3 и 1.1.4.

Таблица 1.1.2 – Вклад частей водосбора, расположенных в сопредельных странах в общий объем стока р. Амур

Страна	Площадь водосбора		Объем стока	
	тыс. $\text{км}^2$	%	$\text{км}^3$	%
Россия	1003	54	249	72
Китай	820	44	94.9	27
Монголия	32	2	2.0	1

Таблица 1.1.3 – Многолетние характеристики стока р. Амур по створам

№ п/п	Река – пункт	Площадь водосбора, тыс. $\text{км}^2$	Период наблюдений	Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$	$C_v$
1	Амур – с. Покровка	370	1896-1960	880	0.36
2	Амур – с. Гродеково	726	1912-1968	3490	0.23
3	Амур – с. Помпеевка	862	1898-1962	4700	0.23
4	Амур – г. Хабаровск	1630	1896-1987	8480	0.22
5	Амур – г. Комсомольск	1730	1933-1987	9765	0.20
6	Амур – с. Богородское	1790	1963-1987	10220	0.19

Таблица 1.1.4 – Среднемноголетний сток основных рек в бассейне р. Амур

№ п/п	Река	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Среднегодовой расход, м <sup>3</sup> /с	Годовой объем стока, км <sup>3</sup>		
				Средний	Наибольший	Наименьший
Забайкальский край						
1	Аргунь	164	204	6.44	11.4	2.84
2	Газимур	12.1	22.6	0.71	2.62	0.11
3	Шилка	206	531	16.8	39.3	5.93
4	Онон	96.2	198	6.25	14.2	2.12
5	Ингода	37.2	124	3.91	8.81	1.34
6	Нерча	27.5	99.4	3.13	7.78	0.81
7	Амазар	11.1	33.4	1.05	2.56	0.29
Амурская область						
8	Зея	233	1740	54.9	92.4	41.0
9	Буряя	70.7	900	28.4	44.8	13.1
10	Гилуй	22.5	195	6.15	11.0	3.53
11	Уркан	16.2	111	3.5	7.03	1.75
12	Селемджа	68.6	670	21.1	39.4	10.0
Еврейская АО						
13	Большая Бира	9.58	125	3.93	7.18	1.64
Хабаровский край						
14	Амур	1855	11330	357	446	238
15	Амгунь	55.5	672	22.2	29.4	12.5
16	Бикин	22.3	253	8	15	4.1
17	Хор	24.7	386	12.1	21.8	6.7
18	Горин	22.4	186	5.9	9.8	1.5
19	Гур	11.8	169	5.3	6.4	3.5
Приморский край						
20	Уссури	193	1435	45	62	29.5
21	Б.Уссурка	29.6	226	7.13	11.6	3.19
22	Арсеньевка	7.06	41.4	1.31	3.25	0.38
23	Раздольная	16.8	68.2	2.15	4.38	0.45
24	Илистая	5.47	20.3	0.64	1.96	0.13

Большая интенсивность летних осадков при значительном предшествующем увлажнении почвогрунтов бассейна способствует образованию мощных дождевых паводков, сопровождающихся наводнениями на многих реках. Наиболее развита паводочная деятельность на реках юга Приморья, в бассейнах Уссури, Шилки, Онона, Зеи, Буреи.

Муссонные летние осадки охватывают обширные площади (100–200 тыс. км<sup>2</sup> и более), продолжительность их составляет 20–30 суток, а количество за отдельные дожди нередко превышает 2–3 месячные нормы (200–400 мм). Суточные максимумы осадков могут превышать 100 мм.

Горный характер течения рек, а также наличие многолетнемерзлых и водонепроницаемых горных пород создают благоприятные условия для быстрого поверхностного стока поступающих обильных муссонных осадков, что приводит к интенсивному (1–3 м/сут) подъему уровня воды в реках.

Наводнения в бассейне р. Амур характеризуются размерами площади затопления, шириной разлива, глубиной затопления пойм и величиной ущерба. Обычные наводнения в Дальневосточном регионе, при которых затапливаются низкие места поймы, наблюдаются почти ежегодно. Средними наводнениями затапливаются сенокосы и пастбища, начинают затапливаться пахотные земли, их повторяемость 1 раз в 2–3 года. Большие наводнения охватывают отдельные бассейны рек и затапливают основные угодья и половину пахотных земель, наблюдаются 1 раз в 3–6 лет. Катастрофическими наводнениями охватываются одновременно несколько крупных бассейнов, ими затапливаются практически все земли поймы, которые выбывают из сельскохозяйственного использования, города и населенные пункты, нарушаются транспортные коммуникации, полностью парализуется хозяйственная деятельность, повторяемость этих наводнений 1 раз в 6–10 лет.

В ходе прохождения обычных и больших наводнений на малых реках, а также в верхнем течении средних и крупных рек, глубина затопления поймы не превышает 1.0–1.3 м, тогда как при катастрофических наводнениях она увеличивается до 2.0 м и более. Для среднего и нижнего течения больших рек при обычных наводнениях характерная глубина затопления поймы составляет порядка 0.3–1.8 м, при больших – от 1.2 до 2.5 м и 1.7–3.6 м – при катастрофических наводнениях. Высота слоя воды на пойме увеличивается вниз по течению до выхода рек на низменности, где паводочные волны распластываются за счет разлива по долине реки. Характеристики прошедших на Амуре наводнений приведены в таблице 1.1.5.

Таблица 1.1.5 – Максимальные расходы воды в створах р. Амур

год	с. Черняево		с. Гродеково		с. Помпеевка		г. Хабаровск		г. Комсомольск	
	м <sup>3</sup> /с	дата	м <sup>3</sup> /с	дата	м <sup>3</sup> /с	дата	м <sup>3</sup> /с	дата	м <sup>3</sup> /с	дата
1928	4180	15.07	29000	31.07	31500	8.08	34500	17.08	—	—
1932	8730	18.06	14600	22.06	19800	29.07	37200	13.09	37900	13.09
1938	8860	16.07	22900	27.07	26000	2.08	29400	22.09	28600	12.09
1951	8070	5.09	20900	8.09	25200	08.09	38900	21.09	35500	29.09
1953	6130	25.06	25100	22.07	24300	29.07	35300	6,7.08	31600	18,19.08
1956	14100	18.06	21700	15.06	25200	20.06	35300	27.09	34200	5.10
1957	6570	4.09	15200	6.09	18300	11.09	36500	20.09	34500	30.09
1958	22200	16.07	29600	21.07	28800	30.07	30100	8,9.08	28500	18-21.08
1959	12700	4.09	26900	9.09	28700	14,15.09	38900	20.09	34700	26-29.09
1960	13800	22.05	21500	26.05	23200	01.06	34300	10,11.9	36400	23-25.09
1961	7370	27.06	16300	27.09	26300	9.07	32500	5,6.08	35500	12,13.08
1963	10900	29.06	19400	13.07	21700	17,18.07	28300	25,26.8	29400	7,8.09
1972	7140	1.09	26500	02.08	—	—	32600	10.08	33200	25.08
1981	18100	18.08	22300	23.08	—	—	30500	6.09	33100	12-14.09
1984	20000	10.08	28000	15.08	—	—	37700	1.09	33900	08.09
2013	9960	18.08	25300	16,17.08	—	—	46000	3,4.09	43200	12.09

На Верхнем Амуре наибольшая частота наводнений всех категорий отмечается в мае, июле и августе; катастрофические наводнения наблюдаются в июле; малые наводнения могут проходить в период третья декада апреля – первая декада сентября. На Среднем Амуре малые наводнения наблюдаются с мая по сентябрь; остальные категории – в июле, августе. На Нижнем Амуре в его верхней части малые наводнения наблюдаются с апреля по октябрь; основная часть больших, выдающихся и катастрофических наводнений отмечаются в августе – сентябре. Ниже по течению наибольшая повторяемость всех категорий наводнений смещается на август – октябрь; максимум катастрофических наводнений на Нижнем Амуре приходится на сентябрь. Общее количество наводнений за 96–112-летний период изменяется от 14 на Среднем Амуре до 28 – на Верхнем и 75 – на Нижнем Амуре.

Выделяются следующие районы преимущественного формирования наводнений на Амуре:

- Верхнеамурский. Горный узел хребтов Большого Хингана, Борщовочного, Яблонового – влияет на нижние течения рек Шилка и Аргуни, Верхнего Гилюя и левобережных притоков среднего течения р. Сунгари. Большие наводнения формируются после дождей со слоем 90–110 мм,



выдающиеся – со слоем более 150 мм. При 200 мм на Верхнем Амуре образуются катастрофические наводнения.

- Зее-Норский. Район стыка горных хребтов Станового, Джагды, Джугдыр. Зона влияния – Верхняя Зeya и правые притоки верховьев р. Селемджи – оказывает влияние на формирование наводнений на Среднем Амуре. Для малых наводнений характерны осадки 50–100 мм за дождь, больших – 100–200 мм, выдающихся и катастрофических – 200–250 мм.
- Селемджино-Буреинско-Амгуньский. Район сочленения хребтов Ям-Алинь, Дусе-Алинь и Буреинского. Зона влияния – реки Селемджа, Бурей и Амгунь. Паводочные волны из района сбрасываются по радиально расходящимся речным системам. Осадки 200–250 мм участвуют в образовании больших и выдающихся наводнений на Среднем и Нижнем Амуре.
- Сунгари-Уссурийский с Маньчжуро-Сихотэ-Алиньским горным районом. Наводнения возникают как на р. Сунгари, так и на р. Уссури отдельно, а также на обеих реках одновременно, оказывая воздействие на прохождение наводнений на Нижнем Амуре, независимо от влияния других крупных притоков.

В силу своего географического положения Приморский и Хабаровский края, а также Амурская область испытывают влияние Тихого океана, сказывающееся в периодическом прохождении через их территории тропических циклонов и тайфунов, приносящих сильные ливневые осадки и вызывающие наводнения.

В бассейнах основных притоков Амура обычно летне-осенние паводки формируются асинхронно, проходя по главной реке поочередно друг за другом и не приводя к значительным затоплениям территории. Однако на Нижнем Амуре пики паводков сливаются в один продолжительный период высокого стояния воды [Ким, Махинов, 1991]. Но поскольку паводок значительно растянут во времени (60-70 дней), то катастрофические события в низовьях реки, как правило, не происходят. Монографии [Соловьев, 1974; Соловьев, 1995] содержат обзор обширных изыскательских работ, выполненных для изучения гидрологического и руслового режима, а также улучшения судоходных условий на Нижнем Амуре.

Максимальный сток в бассейне Амура имеет сложный генезис, наблюдается его исключительная мозаичность и неоднородность условий формирования, как в пространстве, так и во времени. В целом для бассейна Амура характерно преобладание максимумов дождевого стока. В исследовании [Губарева, 2004] были выявлены зависимости максимального стока от физико-географических условий, но они сильно неустойчивы и скорее отражают некую тенденцию. Среди факторов пространственной закономерности формирования максимального стока отмечены удаленность от побережья, высотное расположение водосбора и ориентация по отношению к преобладающему направлению переноса тепла и влаги. В результате сложная

дифференциация величин максимального стока не позволила провести их картирование с помощью изолиний.

Для максимального расхода характерна сезонность. За 115 лет инструментальных гидрологических наблюдений в створе г. Хабаровска превышение уровня 600 см отмечалось восемь раз, из них четыре в период с 1951 по 1959 г. [Махинов и др., 2014]. В работе [Соколова, 2015] отмечается, что за период 1901-2011 гг. максимальные расходы в 87% случаев были вызваны дождевыми осадками, остальные 13% обусловлены талым стоком.

Значительные возможности для снижения риска наводнений и смягчения их последствий связаны с регулированием речного стока водохранилищами. В бассейне Амура расположены несколько крупных водохранилищ: Зейское и Бурейское на территории РФ и Фэнмань, Байшань, Лианхуа, Ниэрцзы на территории КНР в бассейне р. Сунгари.

Строительство Зейской ГЭС у г. Зеи в предгорной части бассейна в 650 км от устья началось в 1964 г. В 1972 г. состоялось перекрытие р. Зеи. Для защиты от наводнений и выработки электроэнергии было организовано Зейское водохранилище многолетнего регулирования с полной  $68.4 \text{ км}^3$  и полезной  $32.1 \text{ км}^3$  емкостью водохранилища, занимающее третье место по объему воды среди водохранилищ России после Братского и Красноярского. Площадь водосбора реки до Зейского гидроузла составляет  $83.8 \text{ тыс. км}^2$ , среднегогодежный сток в створе гидроузла  $24.7 \text{ км}^3$ . Площадь зеркала водохранилища при НПУ 315 м равна  $2420 \text{ км}^2$ . Выход ГЭС на проектную мощность 1330 МВт был произведен в 1980 г. Годовая выработка электроэнергии составляет 4910 млн. кВт·ч. Расчетный максимальный сбросной расход 0.01% обеспеченности через гидроузел составляет  $11\,000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Строительство Бурейского гидроузла в 174 км от устья реки в районе с. Талакан началось в 1978 г., затем было практически остановлено в 1990-е годы и вновь возобновлено в 2000-е. В 2003 г. началось заполнение Бурейского водохранилища, в 2009 г. уровень достиг НПУ 256 м. Среднегогодежный сток в створе гидроузла составляет  $27.4 \text{ км}^3$ . Расчетный максимальный сбросной расход 0.01% обеспеченности через гидроузел составляет  $13\,100 \text{ м}^3/\text{с}$ . При площади водосбора  $65.2 \text{ тыс. км}^2$  Бурейское водохранилище имеет полную 20.9 и полезную емкость  $10.7 \text{ км}^3$ , площадь водного зеркала при НПУ –  $740 \text{ км}^2$ . Проектная мощность Бурейской ГЭС составила 2010 МВт, годовая выработка электроэнергии – 7100 млн. кВт·ч. В настоящее время строится контррегулятор Бурейской ГЭС – Нижне-Бурейская ГЭС.

Количество водохранилищ объемом более 1 млн.  $\text{м}^3$  в китайской части бассейна Амура составляет 33, с меньшим объемом – 2121. Среди них выделяются крупнейшие водохранилища Фэнмань (р. Вторая Сунгари), Байшань (р. Вторая Сунгари), Лианхуа (р. Муданьцзян), Ниэрцзы (р. Нонни), основная информация о которых приведена по данным [Simonov, Dahmer, 2008] в таблице 1.1.6.

Таблица 1.1.6 – Характеристики крупных ГЭС на территории КНР в бассейне р. Амур

Гидроузел	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Средне-многолетний сток, км <sup>3</sup>	Полная/полезная емкость водохранилища, км <sup>3</sup>	Расчетный максимальный сброс через сооружение, м <sup>3</sup> /с	Установленная мощность, МВт
Фэнмань	42.5	13.8	10.8/5.35	1186	809
Байшань	19.0	7.41	6.81/3.54	19100	1500
Лианхуа	30.2	7.19	4.18/–	17500	550
Ниэрцзы	66.4	–	8.61/5.97	20300	250

## 1.2 Обзор существующих оценок изменений климата и речного стока в бассейне Амура по данным гидрометеорологических наблюдений

### 1.2.1 Оценки изменений климата в бассейне Амура по данным наблюдений

В последние десятилетия происходит существенное изменение глобального климата, которое выражается в повышении приземной температуры воздуха. За период инструментальных наблюдений с 1850-х годов среднегодовая глобальная температура увеличилась на 0.7–0.8°C [IPCC, 2013; Второй оценочный доклад..., 2014]. Значительные изменения регионального климата характерны также для бассейна Амура.

В целом тенденции изменения климата в бассейне Амура синхронны глобальным. В работах [Новороцкий, 2007; Мещенина и др., 2007] по среднемесячным данным температуры воздуха и количества осадков за период наблюдений 1891-2004 гг. проанализированы многолетние климатические колебания в бассейне Амура. Столь продолжительные ряды наблюдений имеются по небольшому числу станций (около 20), поэтому использовались данные по дополнительным станциям, имеющим более короткие ряды наблюдений, начиная с 1930-х и 1950-х годов, увеличивая число метеостанций до 40. Важно, что в рядах данных устранялось нарушение однородности вследствие изменения местоположения станции и замены дождемера осадкомером Третьякова в 1950-е годы. Среднебассейновые характеристики получены как среднее арифметическое из имеющихся данных рядов станций, расположенных в бассейне Амура. В упомянутых работах показано, что за прошедшее столетие среднегодовая температура воздуха в бассейне Амура увеличилась на 1.3°C. При этом отмечается рост температуры в прибрежных территориях восточной части бассейна на 0.6°C, а в континентальной западной части на 1.7–2.5°C. Однако в целом потепление происходило с чередованием теплых и холодных периодов. Периодами похолодания принято наиболее холодное двадцатилетие в начале XX века и небольшое похолодание в 1950-е годы, а

периодами потепления 30-е и 40-е годы XX века. Начиная с 1970-х, отмечается устойчивый положительный тренд температуры в бассейне Амура. Причем интенсивность потепления за этот период увеличилась в 2–3 раза по сравнению с периодом 1891–2004 гг. Наиболее интенсивное потепление наблюдалось в весенне-зимний период (до 2–4°C/100 лет). Летом и особенно в осенний период скорость потепления в 2–5 раз меньше.

В бассейне Амура за период 1891–2004 гг. увеличение годовых сумм осадков и сумм осадков за теплый период года (апрель–октябрь) составило 8 и 6% соответственно. В течение семи месяцев с апреля по октябрь в разных частях бассейна Амура выпадает от 70% до 90% годовой суммы осадков. Наибольшее увеличение количества осадков отмечено в холодный период (29%). На фоне интенсивного потепления за период 1975–2004 гг. годовые суммы осадков в среднем в бассейне Амура уменьшались со скоростью 2.1%/10 лет.

В многолетнем режиме наблюдалось чередование сухих и влажных периодов. В восточной и центральной частях бассейна засушливые периоды отмечены для первой половины XX века, а повышенная увлажненность в 1960-е и 1980-е годы. В западной части бассейна засушливые периоды (1900–1910-е и 1970-е годы) сменились на более влажные в 1930–1950 гг. и 1980-е годы. Суммы осадков за холодный период года в центральной и восточной частях бассейна увеличивались с начала периода наблюдений до 1970-х годов, затем в центральной части бассейна рост сумм осадков прекратился, а на Нижнем Амуре продолжился. В западной части бассейна Амура за ноябрь–март увеличение количества осадков характерно для 1900-х, 1940–1950-х и 2000-х годов, уменьшение – в 1970–1990-е годы.

В работе [Болгов и др., 2015] дан анализ климатических тенденций в бассейне Амура с использованием данных наблюдений до 2014 г. Показано, что за десятилетие тенденции изменения температуры воздуха в целом сохранились во все сезоны, но темпы потепления снизились. Наиболее существенно потепление выражено в зимний период, наименее летом. В сумме осадков направленные изменения не выявлены.

Вследствие сложного рельефа и неоднородности синоптических процессов на территории бассейна Амура распределение осадков носит неоднородный, пятнистый характер. Устойчивая муссонная циркуляция характерна только на восточной части бассейна для побережий Японского моря и Татарского пролива, а также для равнинных участков нижнего течения р. Амур. Из-за однородных синоптических процессов для этой территории выявлены районы с синхронным колебанием сумм осадков. С удалением от побережья муссонная циркуляция ослабевает и слабо выражена в бассейнах рек Шилки и Аргуни [Новороцкий, 1999]. Таким образом, влага, испаряясь над субтропическими районами Тихого океана, доводится до бассейна Амура летним муссоном, а затем с речным стоком возвращается в Охотское море.

В работе [Tachibana et al., 2008] по данным реанализа ERA-Interim за 1979–2001 гг. исследовалась межгодовая изменчивость летних осадков в связи с усилением азиатского летнего муссона и стационарного антициклона в районе Охотского моря. Из-за аномальной циклонической циркуляции над Евразией восточно-азиатский летний муссон способствует аномально большому притоку влаги летом с юга, что приводит к высоким паводкам. В статье [Ogi, Tachibana, 2006] по данным за 1971–2004 гг. выявлено, что при положительном значении годового индекса Арктического колебания среднегодовая температура воздуха возрастала над Евразией, особенно для бассейна Амура и Охотского моря. Результаты показывают, что Арктическое колебание существенно влияет на годовой сток Амура. Положительное значение годового индекса Арктического колебания вызывает аномальную горизонтальную конвергенцию потока влаги над бассейном Амура, что приводит к увеличению расходов воды в реках. Аномально высокие расходы половодья также связаны с теплой фазой Арктического колебания, которая способствует таянию снега и мерзлого грунта.

В связи с глобальным изменением климата во всем мире растет интенсивность и продолжительность экстремальных погодных явлений: периодов жары и засухи, сильных дождей [IPCC, 2013]. В работах [Гарцман, 2008; Шамов и др., 2014] для бассейна Амура на фоне современных глобальных гидрометеорологических тенденций в начале XXI века отмечается рост амплитуды и частоты колебаний температуры и осадков, и, как следствие, увеличение числа экстремальных гидрологических событий.

В исследовании [Yu et al., 2013] была проанализирована изменчивость температуры воздуха и осадков на основе суточных (с 1953 по 1995 г.) и месячных данных (с 1950 по 2010 г.) в пяти районах бассейна Амура. Значимость изменений температуры и осадков оценивалась с использованием критерия Манна-Кендалла, а экстремальные температуры и осадки были проанализированы с использованием гидрологических статистических методов. Результаты показали, что средняя годовая температура значительно увеличилась с 1950 по 2010 г. на всем бассейне, в основном в связи с потеплением в весенне-зимний период. При этом годовое количество осадков за этот период значительно изменилось только в нижнем течении р. Амур. С 1953 по 1995 г. частота событий экстремально низких температур снизилась, а частота высоких температур наоборот возросла. Частота экстремальных осадков существенно не изменилась.

Для более точного прогноза и оценки экстремальных гидрологических событий важен учет распределения метеохарактеристик по высоте, особенно в горных районах бассейна Амура. В работе [Возняк, 2002] проведена оценка вертикального температурного градиента на различных высотах водосбора р. Зеи по данным наблюдений на метеостанциях и аэрологическим данным за период 1961–1990 гг. Для моделирования поступления тало-

дождевых вод на поверхность водосбора и анализа процесса формирования стока температурный градиент принимался нелинейным по высоте и непостоянным во времени [Возняк, 2004]. Диапазон изменения температурного градиента подекадно отдельно для каждого из трех месяцев марта, апреля, мая составил  $0.6\text{--}1^\circ\text{C}/100\text{ м}$ , а с высотой от 300 м до свыше 2 км температура дополнительно уменьшается на  $0.05\text{--}0.15^\circ\text{C}/100\text{ м}$ .

### ***1.2.2 Оценки природных и антропогенных изменений речного стока в бассейне Амура за период наблюдений***

Исследование современных изменений стока р. Амур существенно осложняется трансграничными участками рек Амура, Уссури и Аргуни протяженностью более 3500 км, где проводятся регулярные наблюдения только за уровнями воды. Как отмечалось выше, наиболее длительный непрерывный ряд наблюдений за стоком Амура – с 1896 г. у г. Хабаровска. Речной сток у Хабаровска является интегральным стоком Верхнего и Среднего Амура (около 80% всего стока Амура). В работе [Мещенина и др., 2007] на основе данных годового стока Амура в створе г. Хабаровска за период 1900-2005 гг. выявлена тенденция уменьшения стока Амура со скоростью  $0.5\%/10\text{ лет}$ . Понижение водности отмечалось с начала XX века до середины 1910-х годов, затем до 1960-х годов период повышенного стока, а с 1970-х годов водность Амура уменьшалась (в 1980-2005 гг. со скоростью  $12\%/100\text{ лет}$ ). Стоит отметить, что выявленные тенденции уменьшения стока Амура за последние десятилетия во многом обусловлены гидротехническим строительством. Для годовых величин стока, осадков и среднегодовой температуры воздуха в бассейне Амура характерна корреляция со следующими значениями: между осадками и стоком 0.89, между температурой и стоком  $-0.18$ , между температурой и осадками изменяется в зависимости от периода наблюдений от  $-0.06$  до  $-0.18$  [Мещенина и др., 2007]. В указанной работе сделан вывод, что прогнозируемое потепление может привести к уменьшению увлажненности бассейна, и, следовательно, стока Амура. Вывод о снижении годового стока Амура в створе Хабаровска на 8% содержится также в статье [Георгиевский и др., 2014] на основе сравнения среднемноголетних значений стока за базовый (1930-1980 гг.) и современный (1981-2012 гг.) периоды.

На основе анализа данных за 105-летний период наблюдений в работе [Семенов, 2011] показано, что в рядах зимнего минимального стока р. Амур ярко выражен положительный тренд, который особенно обозначился, начиная с 1930-х годов, а минимальный летний сток за тот же период наблюдений наоборот уменьшался.

В исследовании [Соколова, 2013] выявлена статистическая однородность многолетних колебаний годового и максимального стока в целом для всего бассейна Амура по данным за

период с начала наблюдений по 2008 г. За исключением зарегулированных рек внутригодовое распределение стока не претерпело заметных изменений. Аналогично результатам, приведенным в [Семенов, 2011], автором обнаружена тенденция к повышению минимального зимнего стока и увеличению амплитуды его многолетних колебаний.

В XIX веке в бассейне Амура катастрофические наводнения зафиксированы в 1831, 1861, 1872, 1876, 1879, 1881, 1897 гг. [Зайков, 1954], в XX столетии – в 1928, 1958, 1959, 1984, 2013 гг.

С 1896 г. в многолетней динамике максимальных расходов воды Амура направленных изменений не прослеживается, даже с учетом исторического паводка 2013 г. [Дугина и др., 2014]. При этом стоит отметить, что на максимальные расходы существенно повлияло строительство водохранилищ в бассейне во второй половине XX века. В статье [Болгов и др., 2015] также отмечено отсутствие влияния климатических изменений на максимальные уровни. Важно отметить неоднородность рядов многолетних наивысших уровней воды р. Амур в створах у Хабаровска и Комсомольска-на-Амуре в результате значительной временной изменчивости пропускной способности русла, обусловленной перемещением руслоформирующих наносов, а также динамикой пойменных массивов.

В работах [Добровольский, 2011; Добровольский, 2015] показано, что статистически значимые изменения годового стока Амура на всем протяжении XXI века не фиксируются. По мнению автора, прогнозные оценки изменений стока Амура не превышают выборочную изменчивость характеристик наблюдаемого стока.

Как было отмечено в предыдущем разделе, для смягчения неравномерности внутригодового распределения стока воды в бассейне Амура были созданы несколько крупных водохранилищ многолетнего регулирования: Зейское и Бурейское на территории РФ; Фэньмань, Байшань, Лианхуа, Ниэрцзи на территории КНР. Создание этих крупных водохранилищ привело к изменениям сезонного стока рек.

Так, в зимний период сток р. Зеи за счет сработки Зейского водохранилища увеличился с 50 до 800-1000 м<sup>3</sup>/с, что привело к росту уровней зимней межени в среднем течении Амура на 0.3-1.2 м [Ким, 2008]. Средняя амплитуда колебаний уровня воды на участке Благовещенск-Хабаровск снизилась на 1.0-2.3 м [Махинов, 2007]. До строительства водохранилищ доля стока рек Зеи и Буреи в зимнем стоке Среднего Амура составляла около 18%, что в 4 раза меньше по сравнению со стоком р. Сунгари [Гидроэкологический мониторинг..., 2010]. В естественных условиях сток Зеи обычно не превышал 50% годового стока Амура в створе с. Гродеково в 15 км ниже впадения р. Зеи в Амур [Говорушко, Горбатенко, 2013]. После ввода Зейской ГЭС на полную мощность в 1985 г. сток Зеи в теплую часть года уменьшился на 45%, а в холодную увеличился в 20 раз у г. Зея и в 3.5 раза в низовьях р. Зеи [Эдельштейн, Гречушникова, 2006].

По данным замыкающего створа Цзямусы на р. Сунгари на фоне многолетнего, в течение 103 лет, повышения стока в ее водном режиме отмечаются отдельные периоды пониженного (1898-1927, 1974-1980 гг.) и повышенного (1928-1940, 1952-1967, 1980-1998 гг.) стока [Новороцкий, 2009]. В целом за период наблюдений 1898-2000 гг. среднегодовой сток Сунгари увеличивался со средней скоростью 4.2%/10 лет (по г/п Харбин). Начиная с 1953 г., в бассейне р. Сунгари наблюдается снижение среднегодового стока темпами 4-6%/10 лет (по г/п Харбин и Цзямусы). По данным гидропоста у г. Харбин на р. Сунгари за период 1898-1948 гг. средняя величина характерных минимальных расходов воды составляла 117 м<sup>3</sup>/с, в 1953-1987 гг. 260 м<sup>3</sup>/с при среднем за весь период 175 м<sup>3</sup>/с [Говорушко, Горбатенко, 2013].

Естественно, для более точного определения изменений водного режима необходимо было учитывать антропогенные преобразования на водосборе Амура (строительство гидроузлов, наполнение водохранилищ, безвозвратные потери на орошение и т.д.).

Значительная часть исследований посвящена оценкам климатических и гидрологических изменений в бассейне р. Уссури. За последнее десятилетие на юге Дальневосточного региона наблюдается ряд масштабных гидрологических событий редкой повторяемости. Помимо наводнения на Амуре 2013 г. это паводок в бассейне Зейского водохранилища в 2007 г., когда был превышен проектный максимальный расход, экстремально низкая водность Амура летом 2008 г., чрезвычайно высокая водность рек Приморья осенью 2012 г., когда на реках сохранялся летний паводочный режим [Шамов и др., 2014]. Объемы стока осенью 2012 г. составили 200-1000% многолетней нормы. В итоге на реках сформировался ледостав при затопленной пойме, чего ранее не наблюдалось. Повторяемость такого события на региональном уровне оценена в 1 раз за 500-1000 лет.

### **1.3 Обзор существующих методов моделирования речного стока и возможных изменений водного режима в бассейне р. Амур**

Несмотря на исключительную актуальность создания модели формирования речного стока в бассейне р. Амур для исследовательских задач, а также для информационного обеспечения принятия решений по защите от наводнений и другим проблемам безопасности и развития водохозяйственного комплекса этого бассейна, региональной гидрологической модели для всего бассейна Амура не существует. Проведенный нами анализ литературных источников показал, что до настоящего времени проводились лишь исследования по разработке гидрологических моделей для отдельных частей бассейна.

Для описания экстремальных паводковых событий в Тихоокеанском институте географии разработана модель паводочного цикла малого речного бассейна (ПЦ-модель), которая описывает динамику основных компонентов бассейнового влагозапаса вблизи и выше



состояния полной влагоемкости бассейна, когда он находится в состоянии формирования дождевого паводка [Гарцман, 2008]. Эта модель протестирована на более чем 120 бассейнах юга Дальнего Востока РФ (в том числе, расположенных в бассейне р. Амур), Тайваня и Австрии [Gartsman, 2013].

В работе [Макагонова, 2009] проведен анализ многолетней динамики составляющих стока на основе данных расчетов ПЦ-модели, и выявлено общее увеличение стока большинства рек юга Дальнего Востока.

Региональная адаптация модели для исследуемой территории заключается в поиске надежных связей параметров модели с ландшафтными и климатическими характеристиками региона для прогноза стока и исследования неизученных речных бассейнов. С целью получения эмпирического материала для физически обоснованной верификации гидрологических моделей под руководством Б.И. Гарцмана проводится цикл натурных исследований на репрезентативных речных бассейнах.

На примере малых водосборов Приморской водно-балансовой станции разработана концептуальная модель формирования летне-осеннего стока с учетом характера подстилающей поверхности и специфики влагооборота Приморья, которая заключается в доминирующей роли подповерхностных процессов при формировании речного стока [Фалько, 2002]. Величина суммарного испарения с учетом транспирации растительным покровом вычислялась по методу ДВНИГМИ [Березников, 1978], а величина водоотдачи в каждом расчетном слое определялась по уравнению водного баланса. Также в данной работе оценена водоохранная роль леса. Результаты имитационных расчетов летне-осеннего стока в зависимости от различных сценариев вырубки леса подтвердили регулирующее и противозрозионное значение леса в условиях муссонного климата Приморского края.

Другая модель паводочного цикла малого речного бассейна KW-GIUN была усовершенствована путем учета пространственной неоднородности параметров водосборов и эффективных осадков на каждом расчетном шаге [Бугаец, 2011]. Успешная апробация модели выполнена для шести бассейнов (150-700 км<sup>2</sup>), расположенных на территории Приморской водно-балансовой станции.

В статье [Болгов и др., 2016] проведена оценка влияния Зейской ГЭС на максимальные расходы Среднего Амура путем композиции распределений стока Амура и Зеи. Для расчета трансформации паводочных волн применялся метод Калинина-Милюкова. В результате 1%-ный максимальный расход воды в устье Зеи снизился на 9700 м<sup>3</sup>/с или 40% от естественного стока, в створе Амура с. Гродеково уменьшился на ~10000 м<sup>3</sup>/с, что составляет 25% от естественного максимального стока р. Амур.

Гидрометцентром России и НИЦ «Планета» создана система мониторинга,

прогнозирования и оповещения о наводнениях «ГИС Амур» для осуществления эффективного контроля гидрологической обстановки в бассейне [Бориц и др., 2016; Фролов и др., 2016]. Эта система основана на данных наблюдений на метеостанциях и гидрометрических постах, спутниковой информации, расчетах и прогнозах гидрологических ситуаций. Для краткосрочного прогноза притока воды в Зейское водохранилище используется модель Д.А. Буракова [Бураков, Мельникова, 2000].

Существенные результаты по оценке современного состояния климата и водных ресурсов, а также предвычисления их будущих изменений в рассматриваемом бассейне, получены за последние годы с помощью глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана, включающих описание динамики морского льда и процессов в деятельном слое суши с учетом биосферных эффектов [например, Хон, Мохов, 2012; Мохов, 2014; Мохов и др., 2014; Катцов и др., 2014; Добровольский, 2015].

Вследствие глобального потепления в соответствии с уравнением Клаузиуса-Клапейрона увеличивается влагосодержания атмосферы, что весьма вероятно приводит к активизации муссонного переноса и образованию циклонов с более интенсивными осадками. Это может увеличить риск экстремальных наводнений в бассейне Амура. Глобальное потепление может усилить восточно-азиатский летний муссон из-за повышения контраста температуры океана и суши. В результате эффекта дополнительного опреснения водой, поступающей с увеличенным речным стоком Амура, в будущем может ускориться формирование ледостава в Охотском море [Tachibana et al., 2008].

Для оценки возможных изменений гидрологического режима в XXI веке наряду с мультимодельными расчетами в рамках проекта CMIP3 при сценариях семейства SRES использовались мультимодельные расчеты в рамках CMIP5 при сценариях семейства RCP. В статье [Мохов и др., 2014] подробно описаны возможные климатические и гидрологические изменения в бассейне Амура. Отмечается, что на основе результатов мультимодельных расчетов в рамках проекта CMIP3 к концу XXI века при умеренном антропогенном сценарии A1B для бассейна Амура можно ожидать наибольшее увеличение среднего количества осадков в зимний период (до 40%), что в условиях отрицательной температуры способствует увеличению снегонакопления зимой с повышением влагозапаса почвы в последующие сезоны и риска наводнений. В летний период изменения количества осадков незначительны. В целом для весны и осени характерны положительные тенденции, но они менее значимы, чем для зимнего сезона.

Вместе с этим интенсивность осадков на водосборе Амура возрастет для всех сезонов, особенно зимой. Также для зимы отмечено и наибольшее увеличение вероятности осадков. Напротив, летним осадкам присущ отрицательный тренд вероятности, хотя общее их

количество изменяется относительно мало, но при этом они становятся более интенсивными и редкими. Например, в статье [Катцов и др., 2014] во второй половине XXI века особенно отмечается увеличение максимальной пятидневной суммы осадков летом в бассейне Амура.

Анализируя результаты внутригодового хода стока Амура по мультимодельному расчету, представленные в работе [Мохов и др., 2014], в сопоставлении с данными наблюдений за период 1961–1990 гг., можно отметить, что расчетный гидрограф по климатическим моделям завышает весенний сток в половодье и занижает в летне-осенние паводки, что может быть связано с завышенными оценками массы снежного покрова, а также с более интенсивным снеготаянием в период весеннего половодья. При этом по модельным расчетам межгодовая изменчивость стока Амура по величине согласуется с данными наблюдений.

При глобальном потеплении в случае умеренных антропогенных воздействий к концу XXI века для Амура выявлена тенденция увеличения стока на 12% с почти однородным распределением изменений речного стока по сезонам и с несколько меньшим увеличением стока зимой [Хон, Мохов, 2012]. Но в целом такая оценка изменения водных ресурсов Амура к концу XXI века статистически незначима.

В исследовании [Соколова, 2013] на основе анализа расчетных данных нескольких климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана при различных сценариях динамики выбросов парниковых газов получены схожие оценки возможных климатических изменений годового, максимального и минимального стока, которые показывают, что к середине и концу XXI века есть основания ожидать общее увеличение водности рек бассейна Амура на 4–13%.

Согласно мультимодельным расчетам исследования [Nohara et al., 2006] вследствие глобального потепления сток р. Амур также увеличится. В качестве возможной причины этого роста отмечено влияние изменения муссонной циркуляции.

В статье [Добровольский, 2015] анализируются доступные данные расчетов по 37 моделям климата – участникам проекта CMIP5. Показано, что наилучшие результаты при моделировании стока разных рек дают различные модели. Например, лучшее описание среднемноголетнего стока Амура отмечено для модели GFDL-ESM2G. Для исключения значительных ошибок принято использовать ансамбль климатических моделей. Как отмечалось в [Nohara et al., 2006], при усреднении характеристик стока по ансамблю моделей CMIP5 следует ожидать повышения точности оценок возможных изменений речного стока. Однако в работе [Добровольский, 2015] показано, что средние по ансамблю величины удовлетворительно оценивают лишь средний многолетний сток рек и коэффициенты вариации годовых величин со средней ошибкой 10–15%.

В статье [Dobrovolski, 2014] предложен индекс значимости возможных изменений стока как частное от деления оценки изменения годового слоя стока на среднеквадратичную ошибку этой оценки, учитывающую три источника неопределенности прогноза: различия между сценариями эмиссии парниковых газов, различия между результатами моделирования климатической системы разными климатическими моделями, а также внутреннюю естественную изменчивость самой гидрологической системы.

Большинство моделей климата содержат упрощенную параметризацию процессов гидрологического цикла суши, особенно на региональном масштабе. Речной сток вычисляется как разность осадков ( $P$ ) и испарения ( $E$ ), что может приводить к ошибкам, в оценках годового стока, превышающим его возможные изменения. Кроме того, возникают значительные погрешности в оценках внутригодового распределения стока, особенно для водосборов с существенным вкладом снегового питания. Возможности получения более надежных и физически обоснованных оценок изменения стока, обусловленных изменениями климата, связаны с использованием развитых физико-математических моделей формирования речного стока, верифицированных по данным наблюдений в конкретном речном бассейне.

Указанные возможности реализованы в данной работе на примере оценок возможных изменений характеристик водного режима р. Амур в XXI веке с помощью разработанной нами модели формирования стока с использованием ансамблевых расчетов по глобальным моделям климата. Полученные результаты описаны в 4 главе настоящей работы.

## Глава 2. Разработка модели формирования стока р. Амур

### 2.1 Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG: описание структуры и требований к исходным данным

Для описания формирования стока в бассейне р. Амур использовался информационно-моделирующий комплекс ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics), разработанный Ю.Г. Мотовиловым в Институте водных проблем РАН [Motovilov *et al.*, 1999; Свидетельство..., 2013] на основе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов, созданной Л.С. Кучментом [Кучмент и др., 1983].

Информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG включает в себя: модель формирования стока с распределенными параметрами, географическую информационную систему (ГИС), почвенные, ландшафтные и гидрометеорологические базы данных, а также управляющую оболочку. Управляющая оболочка позволяет связать информацию ГИС для рассматриваемой территории с информацией баз данных и визуализировать результаты расчетов в виде различных графиков и схематических карт территории. Общая структура ИМК ECOMAG представлена на рисунке 2.1.1.

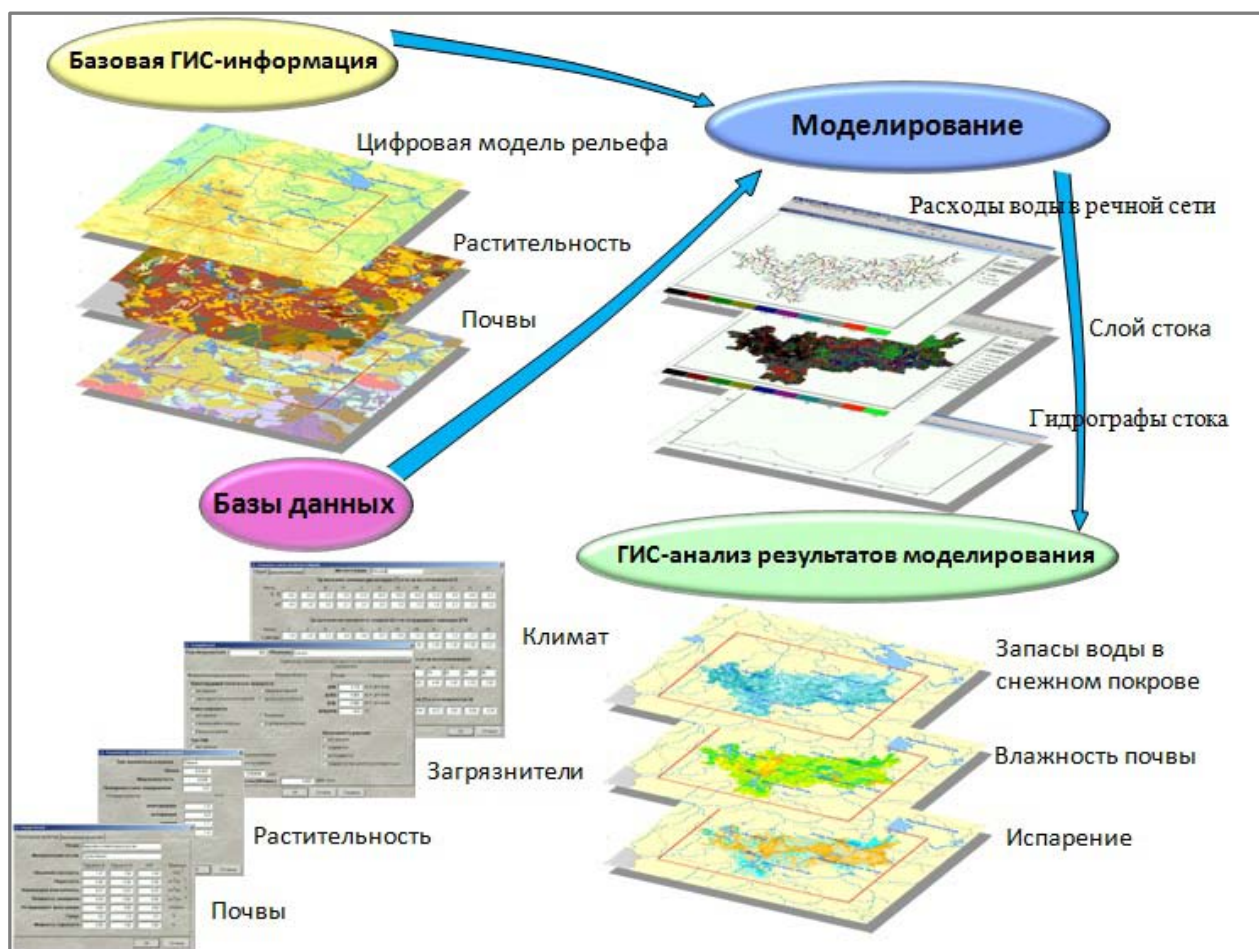


Рисунок 2.1.1 – Структура ИМК ECOMAG

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.

Модельная пространственная схематизация речного бассейна производится на основе исходных тематических сеточных ГИС-слоев территории с помощью модуля Ecomag на базе ГИС-пакета ArcView 3.2 (Рисунок 2.1.2).

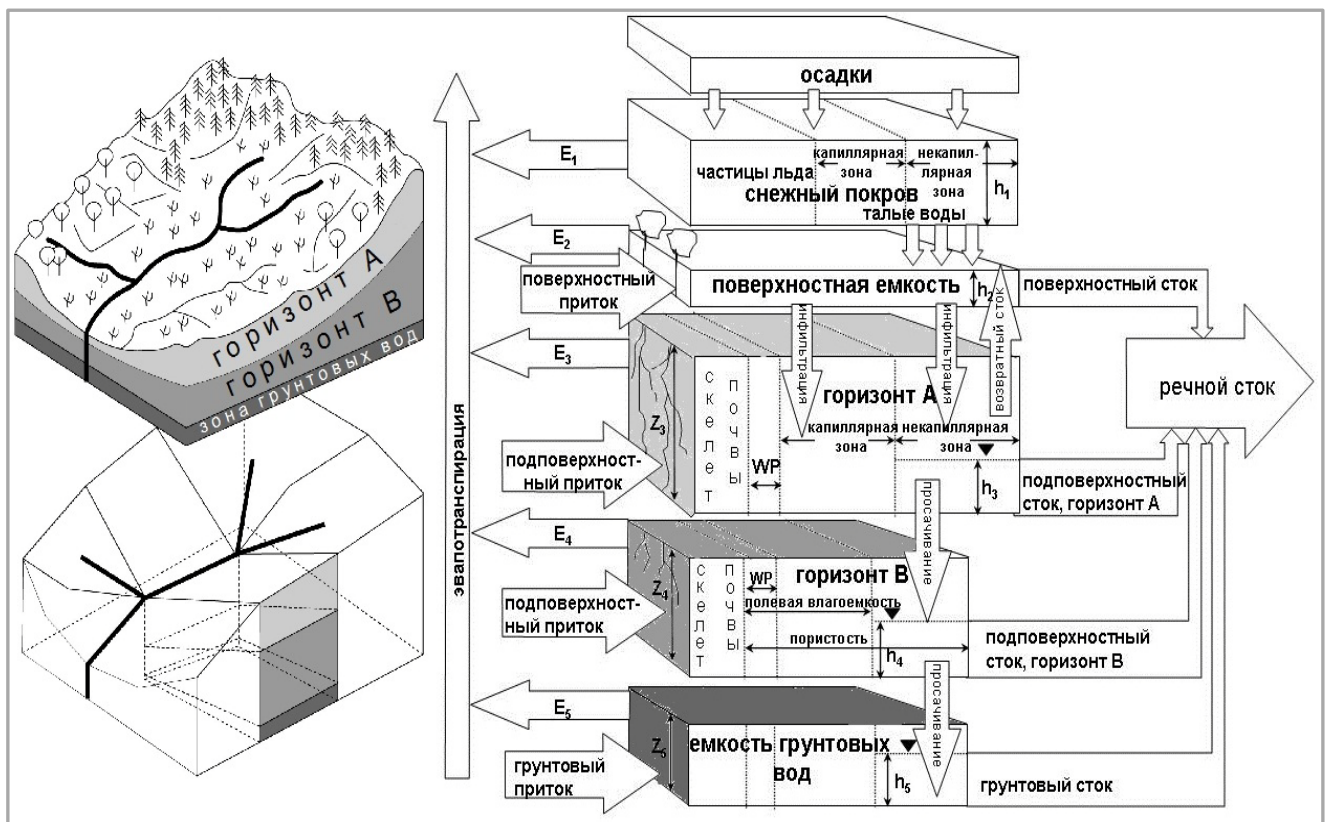


Рисунок 2.1.2 – Схематизация речного бассейна и структура гидрологической модели для расчетного элемента (элементарного водосбора)

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.

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 [Motovilov et al., 1999]. 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

$$F(K) = 1 - \exp(-\alpha K), \quad \alpha = \frac{1}{K_m}, \quad (2.1.1)$$

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 ( $V_I$ ) равна

$$V_I = \int_0^R \exp(-\alpha K) dK = K_m [1 - \exp(-R/K_m)] \quad (2.1.2)$$

Суммарная пористость  $P$  в горизонте почвы разделяется на две части: капиллярную зону (верхний предел влажности почвы – полевая влагемкость,  $FC$ ) и некапиллярную 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

$$F(FC) = \left( \frac{FC}{FCM} \right)^\beta, \quad (2.1.3)$$

где  $FCM$  – максимальное значение  $FC$  на ландшафтном элементе,  $\beta$  – параметр функции

распределения. Среднее значение  $FC$  на элементе ( $FC_m$ ) равно  $FC_m = FCM \frac{\beta}{\beta + 1}$ .

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

$$V_{1,c} = V_l [1 - (W_l / FCM)^\beta], \quad (2.1.4)$$

а просачивание в некапиллярную зону

$$V_{1,nc} = V_l (W_l / FCM)^\beta, \quad (2.1.5)$$

где  $W_l$  – объемная влажность почвы.

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

$$Z_l \frac{dW_l}{dt} = V_{1,c} - E_1, \quad (2.1.6)$$

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

$$E = \begin{cases} k_e d, & \text{при } W > W_e, \\ k_e d(W - W_e), & \text{при } W < W_e, \end{cases} \quad (2.1.7)$$

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  $K_2$  в 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

$$\frac{D_l}{2} \frac{d}{dt} (b_L h_{l,L} + b_0 h_{l,0}) = (V_{1,nc} - R_r - V_2) b_m - (Q_{l,L} - Q_{l,0}) / L, \quad (2.1.8)$$



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 ( $bK_x i h$ ) над максимальной фильтрационной способностью горизонта ( $bK_x i Z$ ),  $Q_l = bK_{x,l} i h_l$ ,  $D_l = P_l - FC_1$ ,  $V_2 = K_2$ ,  $b_m = \frac{b_L + b_0}{2}$ .

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

$$Z_2 \frac{dW_2}{dt} = V_2 - V_3, \quad (2.1.9)$$

где  $V_3$  – 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

$$D_3 \frac{d}{dt} (b_L h_{3,L} + b_0 h_{3,0}) = (V_3 + V_G) b_m - (Q_{3,L} - Q_{3,0}) / L, \quad (2.1.10)$$

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:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (b_L h_{4,L} + b_0 h_{4,0}) = R_0 b_m - (Q_{4,L} - Q_{4,0}) / L, \quad (2.1.11)$$

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

$$\frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{d}{dt}(I h_5) = R_s - E_s - S_T + S_f, \quad (2.1.12)$$

$$\frac{d}{dt}(W_5 h_5) = R_w + S_T - E_w - V_5 - S_f, \quad (2.1.13)$$

$$\frac{dh_5}{dt} = \rho_w \left[ \frac{R_s}{\rho_n} - \frac{S_T + E_s}{\rho_i I} \right] - v_s(h_5, I, W_5), \quad (2.1.14)$$

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:

$$Q_f \frac{dH_f}{dt} = \frac{\lambda_f T_0}{H_f} - \frac{\lambda_T T_g}{H_g - H_f}, \quad (2.1.15)$$

$$H_T = \left( H_f^2 + \frac{2\lambda_T T}{Q_f} \delta t \right)^{0.5}, \quad (2.1.16)$$

где  $H_g$  – глубина уровня грунтовых вод с температурой  $T_g$ ,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_f$ ,  $\lambda_T$  – коэффициенты теплопроводности снега, мерзлой и талой почвы соответственно,  $T_0$  – температура на границе

«почва–снег», равная  $T_0 = \frac{\lambda_s T H_f}{\lambda_s H_f + \lambda_f h_5}$ ,  $Q_f = \rho_w L_f (W - W_u)$  – 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 0°C.

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

$$V_l = K_f \left[ 1 - \exp \left( V_5 / K_f \right) \right], \quad (2.1.17)$$

где  $K_f$  – гидравлическая проводимость насыщенной мерзлой почвы, равная

$$K_f = K_l \left( \frac{P_l - \bar{I} - WP}{P_l - WP} \right)^4 / (1 + k_i \bar{I})^2, \quad \bar{I} = \frac{\rho_w}{\rho_i} \frac{H_f - H_r}{Z_1} (W_1 - W_u) - \text{средняя льдистость промерзшего}$$

слоя почвы,  $k_i$  – эмпирический параметр, равный 8.

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

$$Q_{lat} = Q_{1,n} + Q_{3,n} + Q_{4,n}, \quad (2.1.18)$$

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

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} (b_{6,L} h_{6,L} + b_{6,0} h_{6,0}) = (Q_{lat} + Q_{6,0} - Q_{6,L}) / L_6, \quad (2.1.19)$$

где  $h_6$  – 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).

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

$$\frac{dW}{dt} = Q_{пр} \pm Q_{лед} - k_1 W, \quad (2.1.20)$$

$$Q_{лед} = k_2 \sum T^-, \quad (2.1.21)$$

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.

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 [Кучмент и др., 1983].

С суточным шагом по времени и с пространственным разрешением, равным размеру элементарных водосборов, модель рассчитывает характеристики снежного покрова и снеготаяния, увлажнения, промерзания и оттаивания почвы, поверхностного (склонового), подповерхностного (внутрипочвенного) и грунтового стока, движения воды по русловой сети.

В качестве «входных» данных для расчетов используются многолетние ряды суточных сумм осадков, среднесуточных значений температуры и влажности воздуха, которые могут задаваться по имеющимся наблюдениям на сети гидрометеорологического мониторинга, по данным метеорологического реанализа или рассчитываться по атмосферным моделям.

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 [Motovilov *et al.*, 1999; Motovilov, Gelfan, 2013; Gelfan *et al.*, 2015a; Gelfan *et al.*, 2015b].

ИМК ЕСОМАГ предназначен для широкого круга гидрологических и природоохранных прикладных задач диагностики и прогнозирования. С 2001 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 [Мотовилов, 2003].

## **2.2 Создание баз исходной информации для модели формирования речного стока в бассейне р. Амур**

Для разработки модели конкретного бассейна помимо использования базовых уравнений модели ЕСОМАГ нужно собрать обширный объем информации о подстилающей поверхности из географических баз данных. В качестве основных видов информации для формирования баз данных ИМК ЕСОМАГ используются следующие картографические материалы: цифровые модели рельефа (ЦМР) различного разрешения, серии цифровых тематических карт (почвенная, ландшафтная и т.д.), отражающих характеристики и состояние природных ресурсов, карты расположения пунктов сети гидрометеорологического мониторинга.

В приведенных выше работах по применению ИМК ЕСОМАГ для моделирования речного стока крупных речных бассейнов РФ характеристики почв, растительности и ландшафтов, необходимые для оценки параметров, задавались на основе почвенной карты СССР масштаба 1: 2 500 000, разработанной под руководством М.А. Глазовской, и ландшафтной карты СССР масштаба 1: 2 500 000, разработанной под руководством В.А. Николаева. Источниками информации для задания почвенно-гидрологических характеристик разных типов почв, определяемых по почвенной карте, являлись региональные справочники агрогидрологических свойств 162 типов почв.

Указанные карты и базы данных не могут быть использованы для моделирования формирования стока на всем водосборе р. Амур, поскольку около 46% площади бассейна Амура приходится на территорию КНР и Монголии. В этой связи для определения параметров модели, распределенных по площади всего бассейна, вместо тематических карт, указанных выше, нами впервые были адаптированы глобальные базы данных: почвенная база Harmonized World Soil Database (HWSD) [FAO, 2012] и ландшафтная база Global Land Cover Characterization (GLCC) [Loveland *et al.*, 2000].

Почвенная база данных HWSD является компиляционной на основе четырех источников: почвенной базы данных Европы и Северной Евразии (ESDB, 2004), почвенной карты Китая масштаба 1: 1 000 000 [Shi *et al.*, 2004], различных региональных почвенных карт (SOTER и SOTWIS) и цифровой почвенной карты мира FAO-UNESCO (DSMW, 1971-1981) масштаба 1: 5 000 000. Нужно отметить, что распределение типов почв по данным HWSD на территории РФ соответствует почвенной карте масштаба 1: 2 500 000, разработанной под руководством М.А. Глазовской.

Результирующая карта базы HWSD представлена растровым файлом в формате BIL с пространственным разрешением  $k 1$  км, показывающим распределение 16 000 почвенных ареалов с кодированным идентификатором, и базой данных в формате MS Access. Использование стандартной структуры позволяет связать данные атрибутивной таблицы с растровой картой для отображения состава параметров для каждого типа почв (горизонта А и В): процентное содержание гравия, песка, глины, пыли и органического вещества, объемная плотность, мощность горизонта почвы, текстурный и гранулометрический класс на основе трехчленной классификации почв (USDA-SCS, [Leij *et al.*, 1999]), а также некоторые химические показатели.

Разработанный нами метод расчета почвенных параметров модели по указанным данным [Калугин, 2015] описан в следующем разделе.

Ландшафтная база данных GLCC сформирована Геологической службой США (USGS), Университетом штата Небраска и Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии. Глобальная база земельного покрова состоит из композиции наборов данных, полученных на основе стандартного индекса различий типов растительности (10-дневный NDVI) для каждого континента радиометром высокого разрешения (AVHRR) с временным охватом апрель 1992 г. – март 1993 г. База GLCC представлена растровым файлом с пространственным разрешением  $\times 1$  км. Глобальная классификация содержит 96 типов ландшафтов. Вспомогательными источниками данных служат карты растительности регионального уровня.

Информация о рельефе задействована из базы данных HYDRO1k с размером ячейки сетки матрицы 30x30 сек (разрешение 1×1 км).

База исходной метеорологической информации, необходимой для задания входных данных в модели, была подготовлена нами на основе данных ВНИИГМИ-МЦД. База включает временные ряды среднесуточных величин температуры и влажности воздуха, суточных сумм осадков, измеренных на 232 метеорологических станциях (169 приходятся на российскую часть бассейна) за период 29 лет (1985-2013 гг.). Расположение метеорологических станций, данные измерений которых использованы в работе, показано на рисунке 2.2.1. Перечень станций с указанием их координат дан в Приложении А.

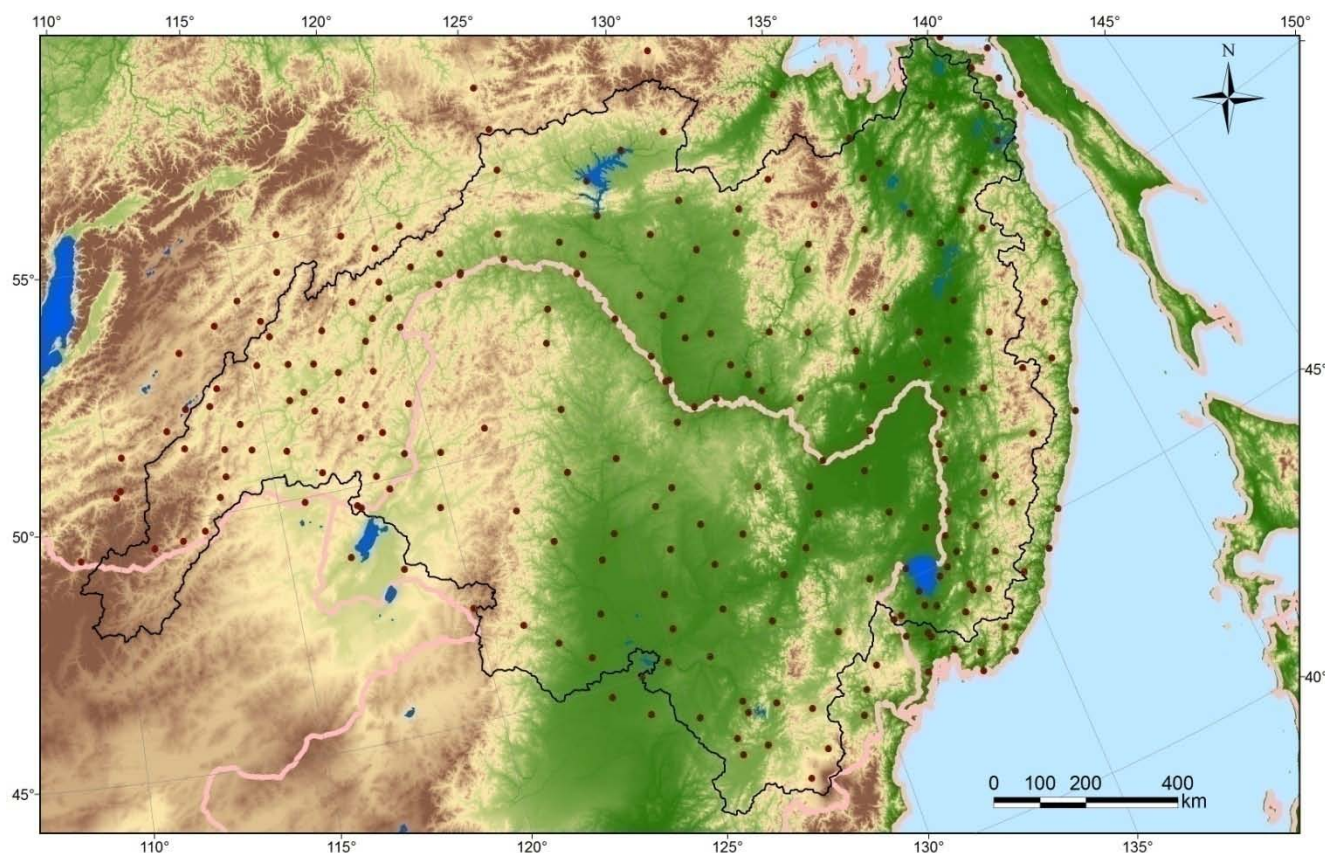


Рисунок 2.2.1 – Расположение метеостанций в бассейне р. Амур и 100-км окрестности

Для проведения гидрологических расчетов по модели ECOMAG была подготовлена база данных гидрологических характеристик, которая включает информацию о суточных расходах воды на различных гидрометрических постах в бассейне Амура (рисунок 2.2.2), а также данные о сбросах воды из Зейского и Бурейского водохранилищ. Многолетние ряды расходов воды, необходимых для калибровки модели, получены из ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [Ежегодные данные..., Т.1, вып.19,20,21]. Ряды данных по притоку и сбросам воды из Зейского и Бурейского водохранилищ составлены на основе оперативных данных Росводресурсов.



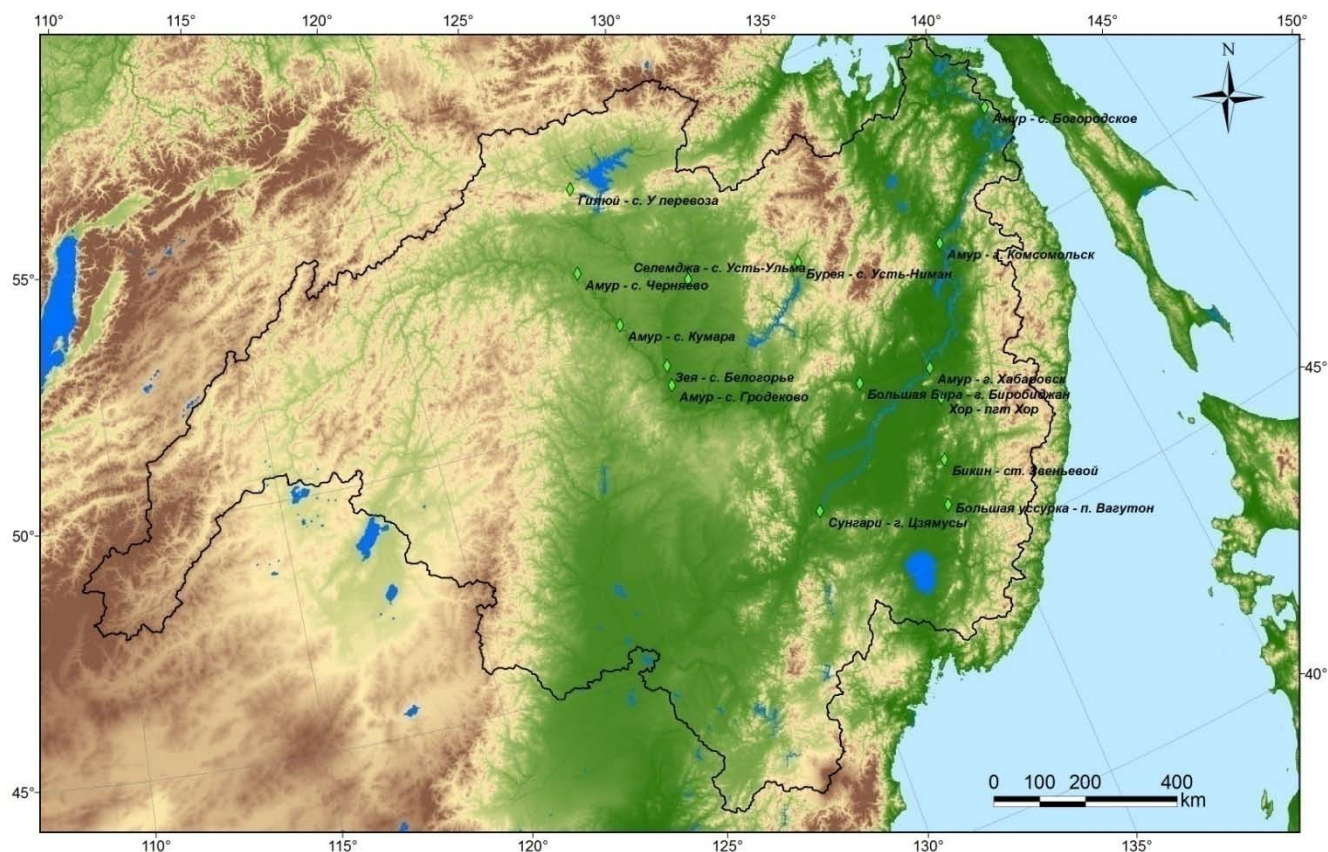


Рисунок 2.2.2 – Расположение гидрометрических постов в бассейне Амура, данные по которым использовались для калибровки модели

## 2.3 Разработка модели формирования стока р. Амур: оценка параметров, калибровка и проверка модели

### 2.3.1 Оценка параметров модели формирования стока по информации из глобальных баз данных о характеристиках бассейна р. Амур

#### *Схематизация водосбора и речной сети по цифровой модели рельефа*

Для моделирования процессов гидрологического цикла и стекания воды по склонам водосбора и в русловой сети необходимо провести модельную схематизацию речного бассейна и речной сети, чтобы получить информацию о древообразной структуре водотоков, прилегающих склонах, с которых вода попадет на данный участок реки, а также распределение типов почв и землепользования в пределах отдельных участков. Схематизация бассейна Амура проводилась на основе ЦМР HYDRO1k с использованием специализированного модуля Ecomag в ГИС-пакете ArcView 3.2, который позволяет выделять речную сеть с необходимым пространственным разрешением и оконтуривать водосборные площади.

Алгоритм автоматизированного выделения элементарных речных водосборов и модельной речной сети заключается в построении полей линий тока, вычислении направлений

и концентрации потоков на основе ЦМР. Ячейки с высоким значением аккумуляции потоков образуют модельную гидрографическую сеть. После этого включается процедура «разбиения» рассматриваемого бассейна на элементарные водосборы, представляющие собой частные водосборные площади между узлами речной сети, которые, обладая интегрирующим водным потоком, направленным по углу падения склонов и по руслам, и четким водоразделом, являются пространственными расчетными ячейками модели ECOMAG. Таким образом, элементарный водосбор является расчетной единицей для моделирования крупного речного бассейна, состоящего из множества таких водосборов.

При схематизации водосбора Амура оптимальным минимальным количеством расчетных ячеек ЦМР, сток с которых начинает формировать речную сеть, было принято 500. Речная сеть, построенная по ЦМР HYDRO1k, сравнивается с фактической речной сетью на рисунке 2.3.1.1, из которого видно, что выбранное пространственное разрешение позволило с хорошей точностью описать структуру и конфигурацию речной сети бассейна р. Амур.

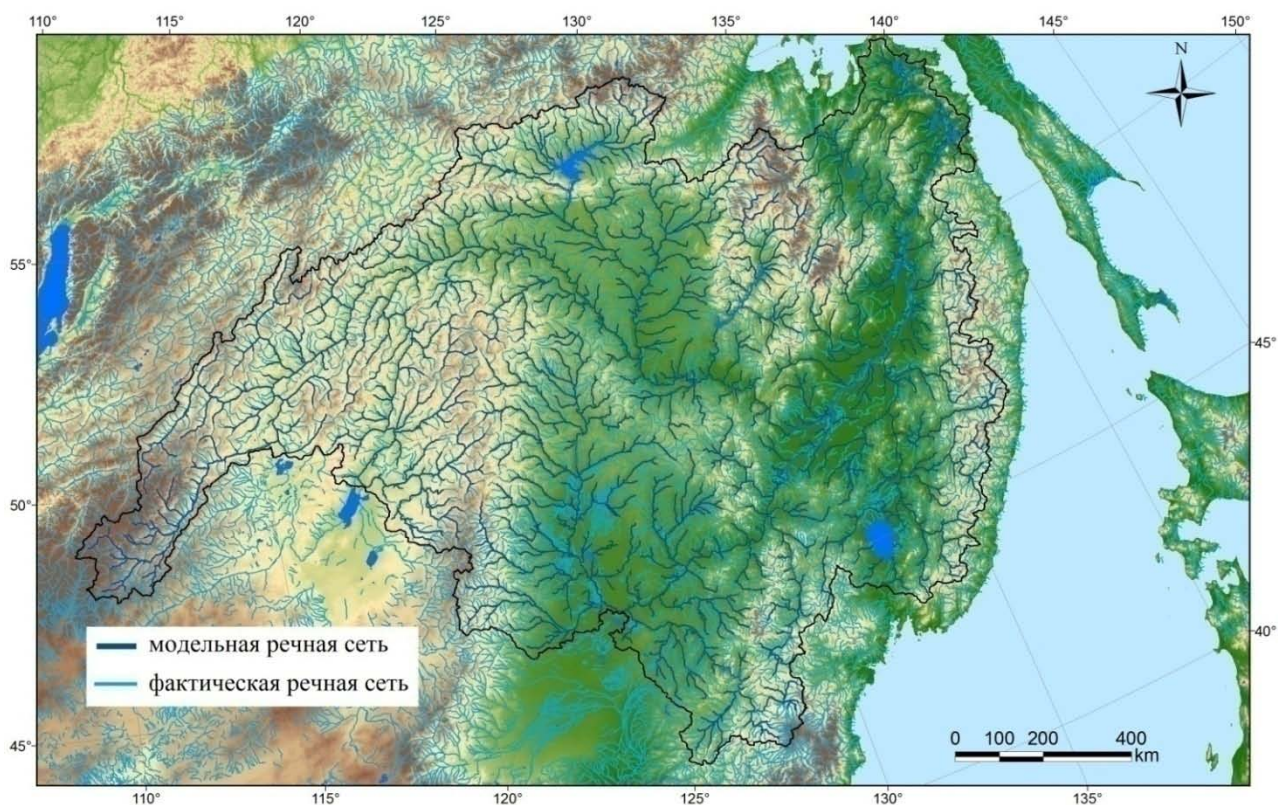


Рисунок 2.3.1.1 – Модельная и фактическая речная сеть бассейна Амура

Средняя площадь построенных элементарных речных водосборов в бассейне Амура составила 944 км<sup>2</sup>. Распределение расчетных элементарных водосборов в пределах бассейна показано на рисунке 2.3.1.2. В модели интерполяция метеорологических характеристик для каждого элементарного водосбора организована по данным ближайших 5 метеостанций.



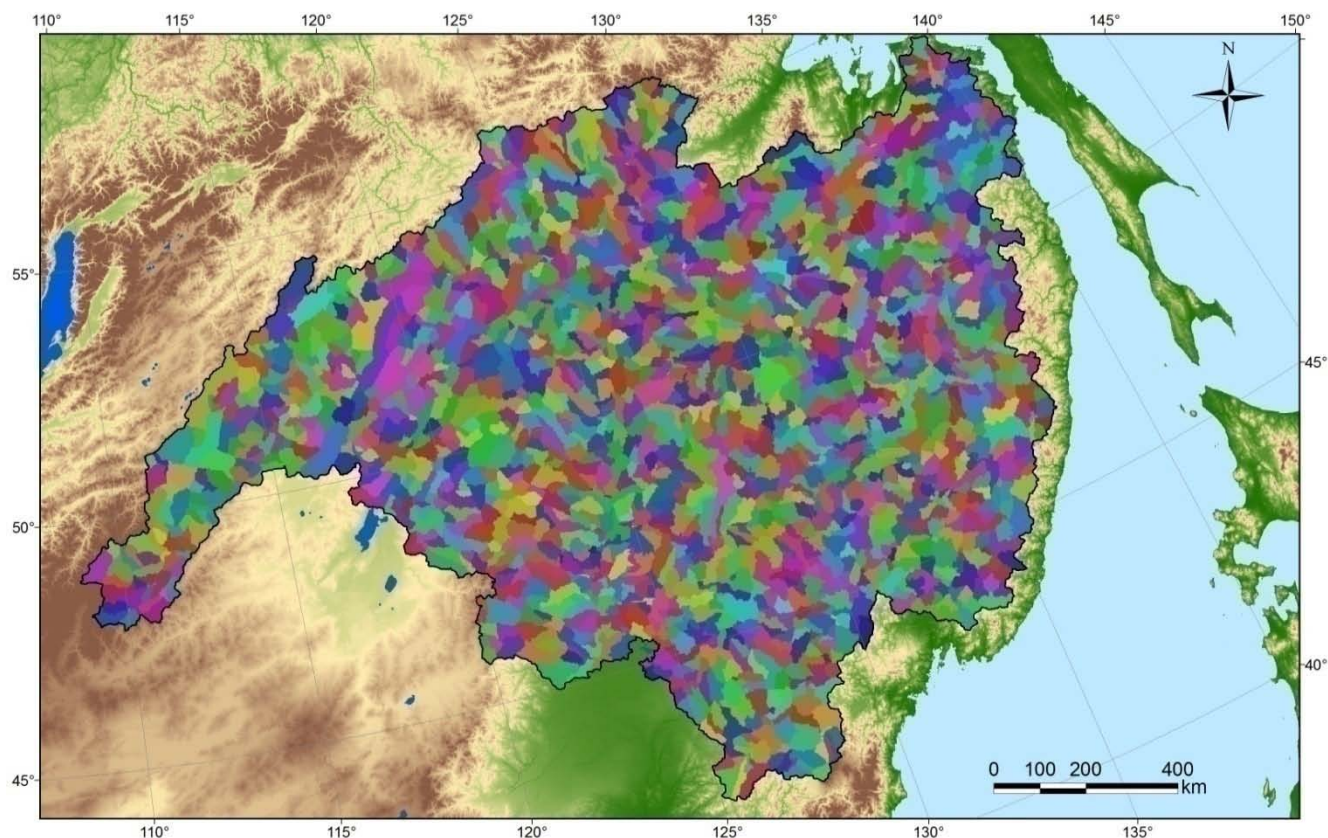


Рисунок 2.3.1.2 – Расчетные элементарные водосборы в бассейне Амура

Площадь водосбора р. Амур по модельной структуре речной сети составила 1 837 000 км<sup>2</sup>. Погрешность определения площади водосбора оказалась менее 1% по сравнению с данными, приведенными в [Многолетние данные..., 1986], где площадь бассейна за вычетом бессточных областей в районе озера Далайнор оценивается как 1 855 000 км<sup>2</sup>. В работе [Гарцман, Галанин, 2011] приведена гипотеза, что речная сеть в районе юго-западного водораздела бассейна Амура в пределах субаридной зоны сформировалась в одну из предшествующих более влажных климатических эпох, а вследствие усиления засушливости испытывала устойчивое воздействие эоловых процессов.

*Оценка почвенно-гидрологических параметров модели по глобальной почвенной базе Harmonized World Soil Database (HWSD)*

Гидрофизические характеристики почвы (в отечественной литературе «почвенно-гидрологические константы») – наименьшая полевая влагоемкость, влажность завядания, коэффициент фильтрации, пористость почвы – ключевые параметры модели, влияющие на расчеты влагосодержания почвы. Кроме того, некоторые из этих характеристик используются как аргументы в формулах расчета теплофизических параметров модели (коэффициентов теплопроводности и теплоемкости) и влияют на результаты расчета промерзания и оттаивания почвы. Данные измерений почвенно-гидрологических констант для почв российской части бассейна Амура очень скудны, а для его китайской части отсутствуют. Перспективы

определения почвенно-гидрологических констант при недостаточности измерений связаны с возможностью нахождения их связей с измеряемыми свойствами почвы. Соотношения для нахождения гидрофизических характеристик почв, прямое измерение которых трудоемко и дорого, по легко измеряемым показателям (гранулометрическому составу, объемному весу, содержанию органических веществ и другим) получили название «педотрансферные функции» (pedotransfer functions – PTFs) в современной физике почв. Использование PTFs основано на допущении, что водоудерживающая способность и влагопроводность почвы, зависят, в большей степени, от размера и плотности слагающих почву частиц, чем от генезиса почвы и физико-географических условий территории. Это допущение позволяет распространять PTFs, найденные на основе детальных лабораторных и полевых измерений, на почвы того же механического состава, но расположенные в других физико-географических условиях, где такие измерения не проводились. Обзор большого числа работ, проводившихся до середины 1980-х годов, по построению PTFs для разных почв дан в книге А.М. Глобуса [Глобус, 1987]. Однако наибольшее развитие исследования PTFs получили в последние 15–20 лет в связи с появлением общедоступных баз данных, аккумулирующих множество измерений почвенных свойств в разных регионах. Гидравлическая проводимость почвы при полном насыщении (коэффициент фильтрации) измеряется с меньшей точностью, чем основная гидрофизическая характеристика (ОГХ, зависимость капиллярно-сорбционного потенциала почвы от ее влажности), поэтому она оценивается, как правило, по ОГХ с использованием допущений о структуре пористого пространства почвы. Обзор подходов к оценке почвенно-гидрологических констант с помощью PTFs дан в монографии [Гельфан, 2007].

Широкое распространение получили PTFs, представляющие собой регрессионные зависимости измеренных величин влажности при фиксированных значениях капиллярно-сорбционного потенциала от содержания в почве фракций песка, пыли, глины, органических веществ, объемного веса почвы. Эти зависимости служат для определения величин наименьшей полевой влагоемкости и влажности завядания по значениям потенциала, соответствующим этим величинам. Примеры зависимостей, обобщающих данные измерений на тысячах почвенных образцов, приведены в работах [Hall et al., 1977; Rawls, Brakensiek, 1982; Cosby et al., 1984] и многих других. В работе [Bastet et al., 1999] на данных независимых измерений сравниваются результаты расчетов отдельных точек на кривой ОГХ с помощью нескольких распространенных регрессионных PTFs. Показано, что отклонения влажности, рассчитанной с помощью PTFs, от измеренной могут быть довольно велики, особенно в области высоких потенциалов, причем предпочтение не может быть дано ни одной из сравниваемых PTFs: функции с малым числом аргументов зачастую давали лучшие результаты, чем более сложные зависимости.



Расчеты гидрофизических характеристик 70 типов почв, выделенных в бассейне Амура, выполнялись по данным глобальной почвенной базы HWSD (рисунок 2.3.1.3).

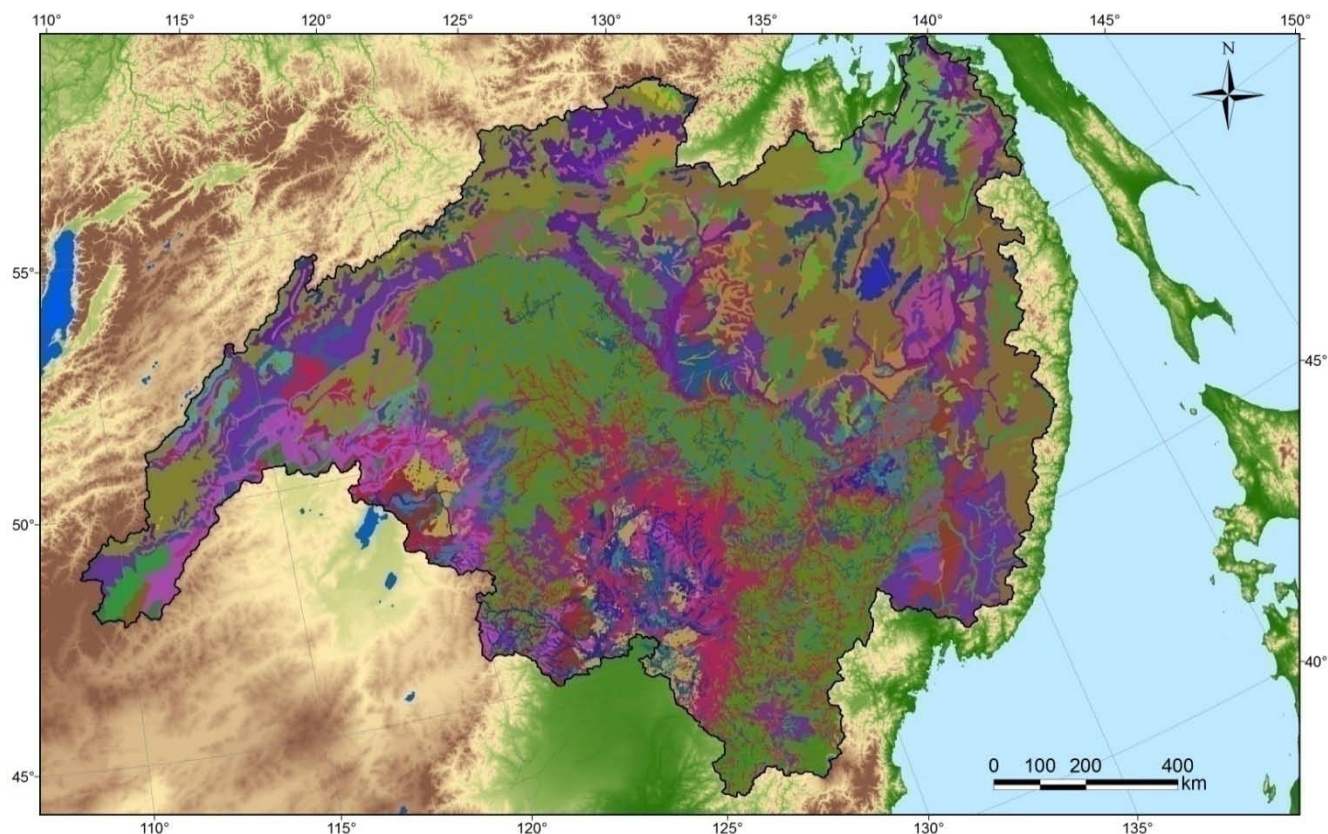


Рисунок 2.3.1.3 – Карта почвенного покрова бассейна р. Амур (HWSD)

Легенда к почвенной карте бассейна Амура

ТИПЫ ПОЧВ		
Albic Luvisols	Eutric Podzoluvisols	Humic Cambisols
Calcaric Arenosols	Eutric Regosols	Lithic Leptosols
Calcaric Cambisols	Ferric Podzols	Luvic Chernozems
Calcaric Fluvisols	Fibric Histosols	Luvic Kastanozems
Calcaric Phaeozems	Gelic Gleysols	Luvic Phaeozems
Calcaric Regosols	Gelic Histosols	Mollic Fluvisols
Calcic Chernozems	Gelic Regosols	Mollic Gleysols
Calcic Gleysols	Gleyic Cambisols	Mollic Planosols
Calcic Kastanozems	Gleyic Chernozems	Mollic Solonchaks
Cambic Arenosols	Gleyic Luvisols	Petric Calcisols
Cambic Podzols	Gleyic Phaeozems	Rendzic Leptosols
CHERNOZEMS	Gleyic Podzols	Rock outcrops
Cumulic Anthrosols	Gleyic Podzoluvisols	Salic Fluvisols
Dunes & shift.sands	Gleyic Solonchaks	Sodic Solonchaks
Dystric Cambisols	Gleyic Solonetz	Stagnic Luvisols
Dystric Fluvisols	Haplic Andosols	Stagnic Phaeozems
Dystric Gleysols	Haplic Arenosols	Terric Histosols
Dystric Leptosols	Haplic Chernozems	Umbric Andosols
Dystric Planosols	Haplic Greyzems	Umbric Gleysols
Dystric Podzoluvisols	Haplic Kastanozems	Umbric Leptosols
Eutric Cambisols	Haplic Luvisols	Urban, mining, etc.
Eutric Fluvisols	Haplic Phaeozems	Water bodies
Eutric Gleysols	Haplic Podzols	
Eutric Leptosols	Haplic Solonchaks	

По величинам процентного содержания песка, глины, гравия и органического вещества с применением PTFs (2.3.1.1–2.3.1.10), предложенных в работе [Saxton, Rawls, 2006], для каждого типа почв нами рассчитывались следующие почвенно-гидрологические константы, задаваемые как параметры модели: объемная плотность, пористость, наименьшая полевая влагоемкость, влажность завядания, коэффициент фильтрации.

$$WP = \theta_1 + 0.14 \times \theta_1 - 0.02, \quad (2.3.1.1)$$

$$FC = \theta_2 + (1.283 \times \theta_2^2 - 0.374 \times \theta_2 - 0.015), \quad (2.3.1.2)$$

$$P = FC + \theta_3 - 0.097 \times S + 0.043, \quad (2.3.1.3)$$

$$\rho = (1 - P)2.65 \times (1 - R_v) + 2.65 R_v, \quad (2.3.1.4)$$

$$K_s = 1930(P - FC)^{(3-\lambda)}, \quad (2.3.1.5)$$

где  $WP$  – влажность завядания,  $FC$  – наименьшая полевая влагоемкость,  $P$  – пористость ( $\text{см}^3/\text{см}^3$ ),  $\rho$  – объемная плотность ( $\text{г}/\text{см}^3$ ),  $K_s$  – коэффициент фильтрации ( $\text{см}/\text{сут}$ ),  $S$ ,  $C$ ,  $OM$  – процентное содержание песка, глины и органического вещества в почве (%),  $R_v$  – объемная плотность гравия ( $\text{г}/\text{см}^3$ ),  $\lambda$ ,  $B$ ,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – параметры, определенные на основе данных о механическом составе по эмпирическим зависимостям и равные:

$$\theta_1 = -0.024S + 0.487C + 0.006OM + 0.005(S \times OM) - 0.013(C \times OM) + 0.068(S \times C) + 0.031, \quad (2.3.1.6)$$

$$\theta_2 = -0.251S + 0.195C + 0.011OM + 0.006(S \times OM) - 0.027(C \times OM) + 0.452(S \times C) + 0.299, \quad (2.3.1.7)$$

$$\theta_3 = 0.278S + 0.034C + 0.022OM - 0.018(S \times OM) - 0.027(C \times OM) - 0.584(S \times C) + 0.078, \quad (2.3.1.8)$$

$$\lambda = 1/B, \quad (2.3.1.9)$$

$$B = (\ln(1500) - \ln(33)) / (\ln(FC) - \ln(WP)), \quad (2.3.1.10)$$

На рисунках 2.3.1.4 и 2.3.1.5 приведены карты распределения рассчитанных значений наименьшей полевой влагоемкости и влажности завядания для типов почв бассейна Амура, по которым можно оценить особенности формирования стока в различных природных зонах.



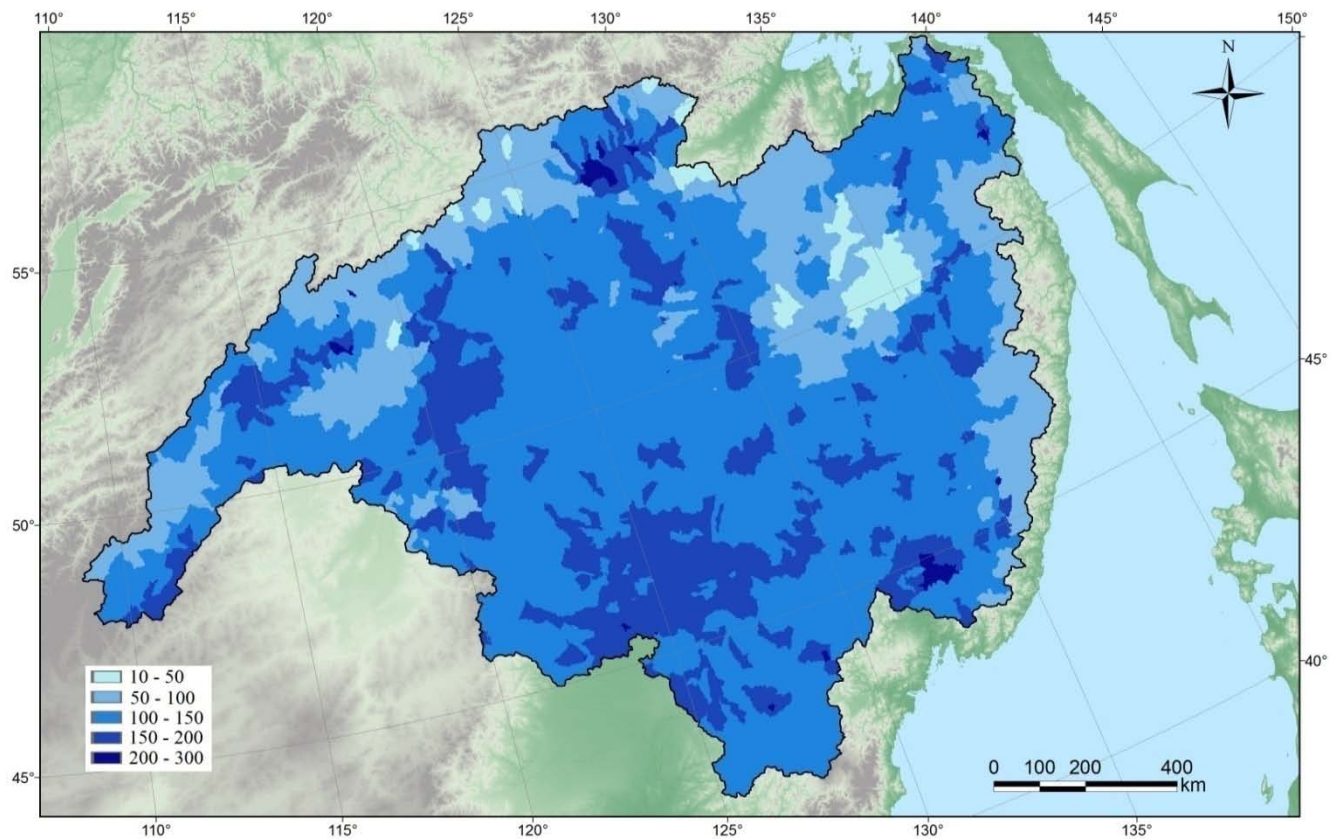


Рисунок 2.3.1.4 – Карта распределения рассчитанных значений наименьшей полевой влагоемкости верхнего полуметрового слоя почв бассейна Амура (мм)

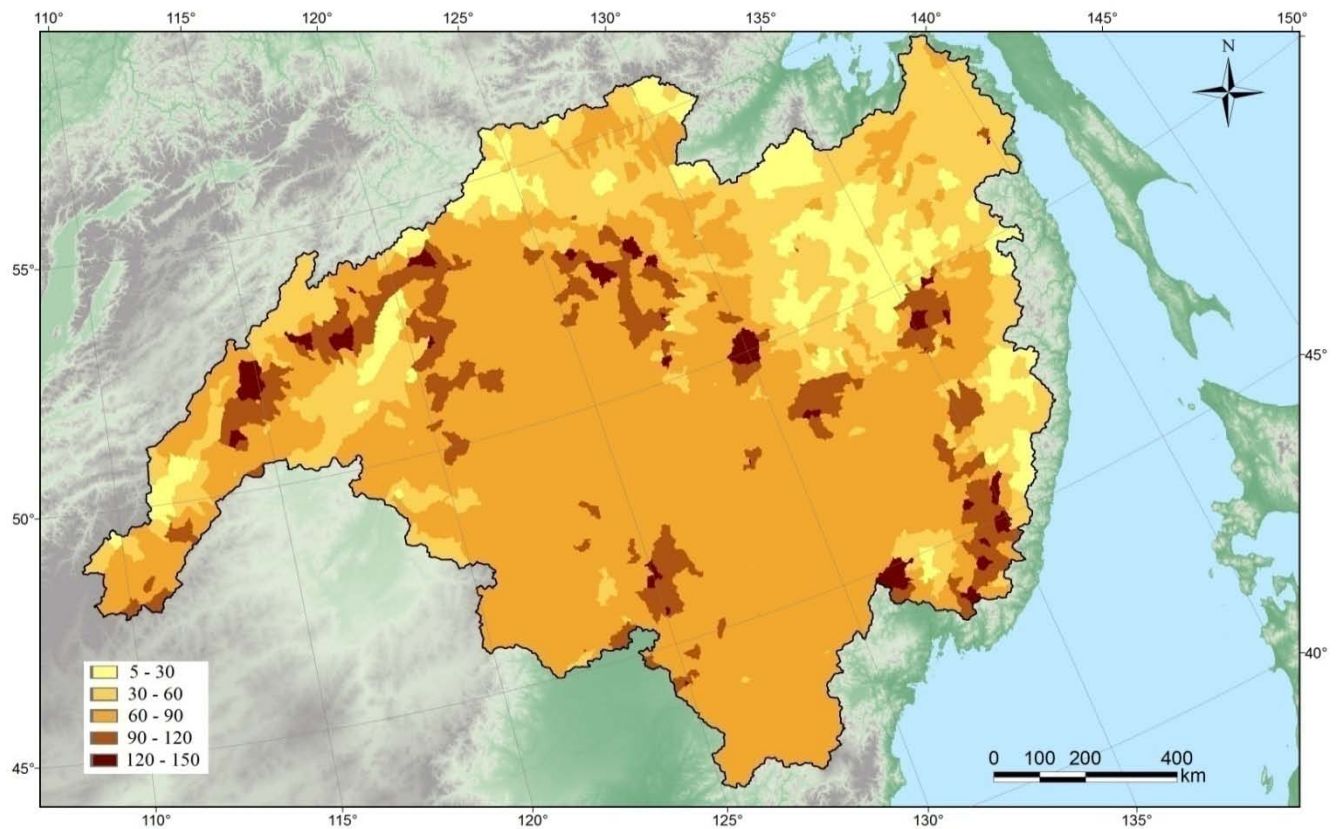


Рисунок 2.3.1.5 – Карта распределения рассчитанных значений влажности завядания верхнего полуметрового слоя почв бассейна Амура (мм)

Часть параметров модели задана по данным глобальной базы типов ландшафтов GLCC (рисунок 2.3.1.6). Для каждого из 22 выделенных типов землепользования в бассейне Амура определялись следующие параметры модели: коэффициенты вертикальной фильтрации и стаивания, испарения почвенной влаги и промерзания почвы.

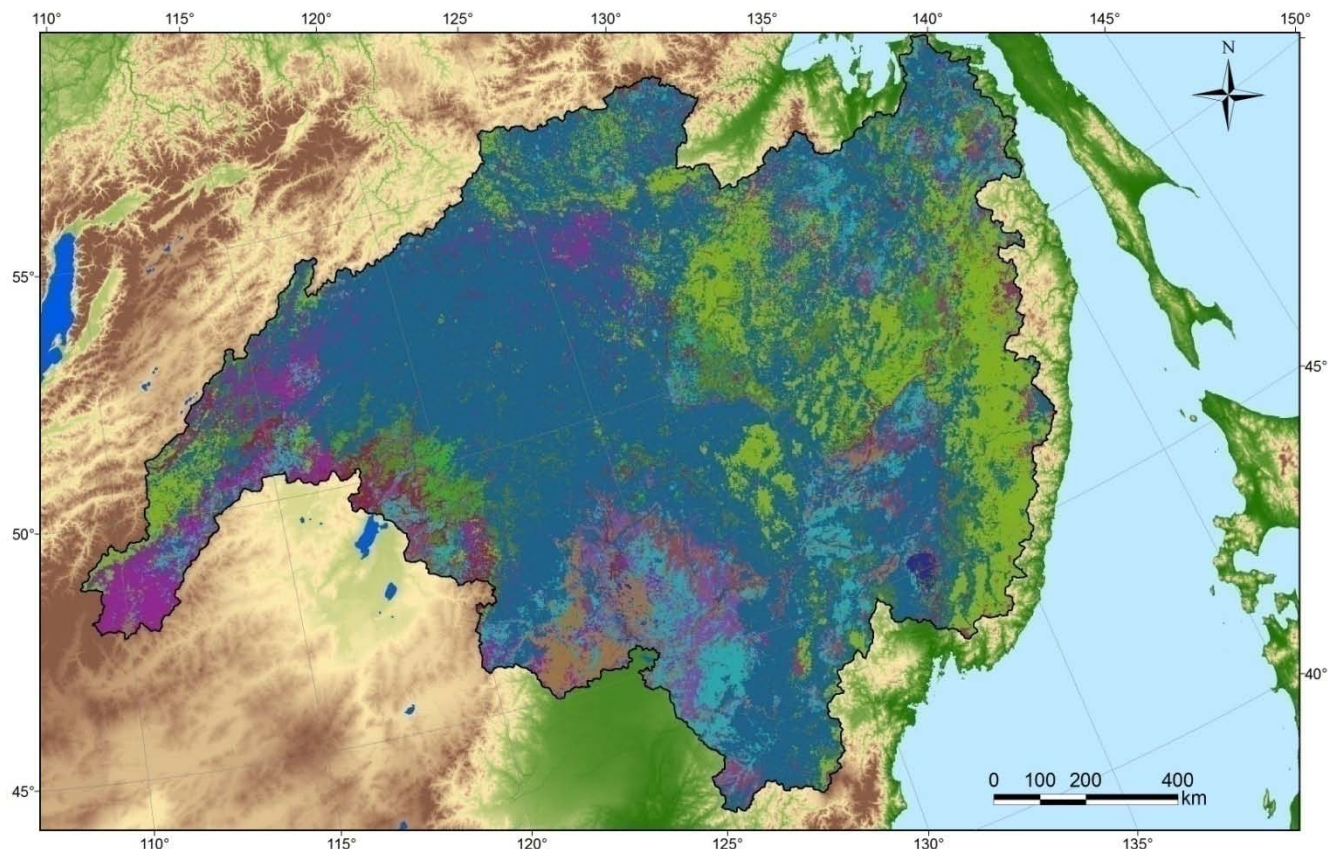
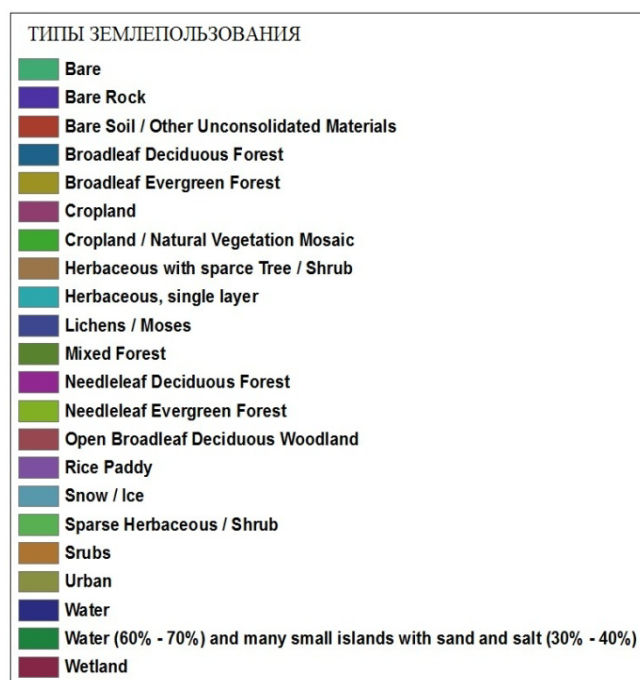


Рисунок 2.3.1.6 – Карта типов ландшафтов в бассейне р. Амур (GLCC)

Легенда к карте ландшафтов бассейна Амура





### 2.3.2 Калибровка и проверка модели по данным о речном стоке в различных створах речной сети

Уравнения модели ECOMAG содержат параметры и коэффициенты, которые имеют определенный физический смысл и могут быть измерены в лабораторных или полевых условиях. Большая часть этих параметров задается из баз данных характеристик почв и растительности. Однако в ряде случаев диапазон изменения некоторых параметров модели достаточно широк, и, соответственно, в модели калибруются не параметры частных речных водосборов, а характеристики типов почв, растительности и подстилающей поверхности для всего речного бассейна, например, вертикальный и горизонтальный коэффициенты фильтрации для типов почв, коэффициент стаивания снега и испарения для типов растительности и т.д.

Каждый элементарный водосбор обладает своим набором типов почв, ландшафтов, высотным распределением, от которых зависят параметры модели. При этом важно подчеркнуть некоторые особенности калибровки модели ECOMAG. Во-первых, значения ключевых параметров, оцениваемых по данным литературных источников или натурным измеренным характеристикам рельефа, почвенного и растительного покрова, рассматриваются в качестве начальных значений параметров для калибровки, и задачей является нахождение оптимальных параметров в окрестности этих начальных значений. Во-вторых, процедура калибровки организована таким образом, чтобы сохранить соотношение между значениями конкретного пространственно-распределенного параметра для выделенных на водосборе типов почв и характеристик ландшафтов. Так, например, если определенные по педотрансферным функциям значения коэффициента фильтрации для песчаных и глинистых почв отличаются в 10 раз, то это соотношение сохраняется в процессе калибровки. Таким образом, в результате калибровки ищется набор пространственно-распределенных параметров для всего бассейна, отражающих заданное распределение характеристик почв и ландшафтов на его территории. Полный список параметров модели ECOMAG приведен в таблице 2.3.2.1.

Таблица 2.3.2.1 – Перечень калибруемых параметров модели ECOMAG

№	параметр	размерность
пространственно-распределенные параметры в зависимости от типа почвы		
1	объемная плотность	г/см <sup>3</sup>
2	пористость	см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>
3	наименьшая полевая влагоемкость	мм
4	влажность завядания	мм
5	вертикальный коэффициент фильтрации	см/сут
6	горизонтальный коэффициент фильтрации	см/сут

7	мощность почвенного горизонта	м
8	теплопроводность почвы	Дж/(м×с×°С)
пространственно-распределенные параметры в зависимости от типа землепользования		
9	коэффициент стаивания	мм/сут×°С
10	поверхностное задержание	мм
11	коэффициент шероховатости Маннинга для склона	с/м <sup>1/3</sup>
сосредоточенные параметры		
12	параметр испарения в верхнем горизонте почвы	мм
13	критическая температура определения фазы атмосферных осадков	°С
14	критическая температура таяния снежного покрова	°С
15	коэффициент шероховатости Маннинга для русла реки	с/м <sup>1/3</sup>
16	вертикальный градиент температуры воздуха	°С/м

Моделируя бассейн такой крупной реки как р. Амур в рамках единой модели, т.е. при одном наборе параметров для всего бассейна, сток рассчитывается в любой точке речной системы, что позволяет учесть особенности формирования стока не только на главной реке, но и на притоках. Калибровка параметров проводилась путем расчета распространенного в гидрологических исследованиях критерия *NSE* соответствия рассчитанных и фактических суточных гидрографов стока, а также систематической ошибки расчета *BIAS* (2.3.2.1, 2.3.2.2). Критерий Нэша-Сатклифа рассчитывается как:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{f(i)} - Q_{s(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{f(i)} - \overline{Q_f})^2}, \quad (2.3.2.1)$$

где  $Q_{f(i)}$  и  $Q_{s(i)}$  – фактическое и рассчитанное значение расхода воды в  $i$ -е сутки соответственно,  $\overline{Q_f}$  – среднее значение фактических расходов за период  $i=1, 2, 3 \dots n$

Относительная систематическая ошибка расчета (%) оценивается как:

$$BIAS = \frac{\overline{Q_f} - \overline{Q_s}}{\overline{Q_f}} \times 100\% \quad (2.3.2.2)$$

При полном совпадении рассчитанных и фактических значений расходов воды величина *NSE*, как следует из формулы (2.3.2.1), равна единице. Величина  $NSE \leq 0$  означает, что дисперсия ошибок расчета больше дисперсии фактических расходов, т.е. модель не дает пользователю дополнительной информации по сравнению с «наивной» моделью, для которой рассчитанные величины стока считаются равными их среднемноголетней величине. Иными словами, при  $NSE \leq 0$  модель оказывается неэффективной. На основе предложенных в работе [Moriassi et al.,



2015] оценок качества расчетов в зависимости от сочетания величин  $NSE$  и  $BIAS$  принималось, что при расчетах гидрографов среднесуточного стока хорошими могут считаться результаты, когда  $0.70 < NSE \leq 1$  и  $|BIAS| < 10\%$ , удовлетворительными – при  $0.50 < NSE \leq 0.70$  и  $10\% \leq |BIAS| < 15\%$ , неудовлетворительными – при  $NSE \leq 0.50$  или  $|BIAS| \geq 15\%$ . В процессе ручной калибровки минимизировались усредненные (по рассматриваемым створам речной сети) значения критериев  $NSE$  и  $BIAS$ . При усреднении больший вес придавался створам с бо́льшей площадью водосбора.

Расчет за 1993 г. используется как период установления параметров модели формирования стока. Калибровка параметров модели для бассейна р. Амур проводилась для периода с 1994 по 2003 гг. на 15 гидропостах (из них 6 на Амуре и 9 на притоках) с площадями водосборов от 8 до 1790 тыс. км<sup>2</sup> (табл. 2.3.2.2). Для калибровки модели необходима информация по суточным расходам воды. Сбросы из водохранилищ задавались следующим образом. Сбросы Зейского и Бурейского гидроузлов задавались по имеющимся оперативным данным Росводресурсов. Водохранилища в бассейне р. Сунгари описаны подобно озерам моделью линейных емкостей, так как мы не располагали данными по сбросам из китайских водохранилищ. Так же с помощью линейной модели учтен сток воды из озера Ханка. Рассчитанные расходы воды в р. Сунгари проверялись по имеющимся данным за летний период в створе Цзямусы, расположенном в приустьевой области.

Выше г. Хабаровска ведутся измерения только уровней воды р. Амур, поэтому для проверки расчетов стока Верхнего и Среднего Амура данные по расходам воды были восстановлены по зависимостям  $Q=f(H)$  на гидрометрических постах Черняево, Кумара и Гродеково. Для этих створов кривые  $Q=f(H)$  были взяты из материалов «Совместной Российско-китайской схемы комплексного использования ресурсов пограничных участков рек Амур и Аргунь» 1993 г. На рисунке 2.3.2.1 – 2.3.2.3 представлены фактические и рассчитанные суточные гидрографы на основных гидропостах р. Амур. Остальные результаты расчетов суточных гидрографов стока рек из разных частей бассейна Амура за период калибровки модели представлены в Приложении Б.

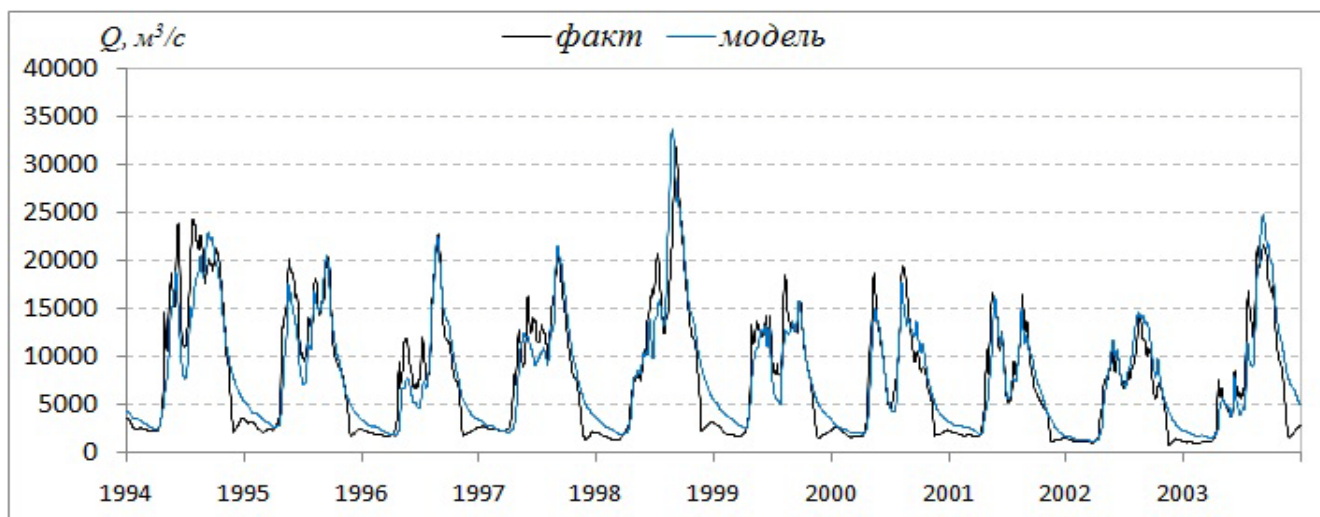


Рисунок 2.3.2.1 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе г. Хабаровск за период калибровки модели

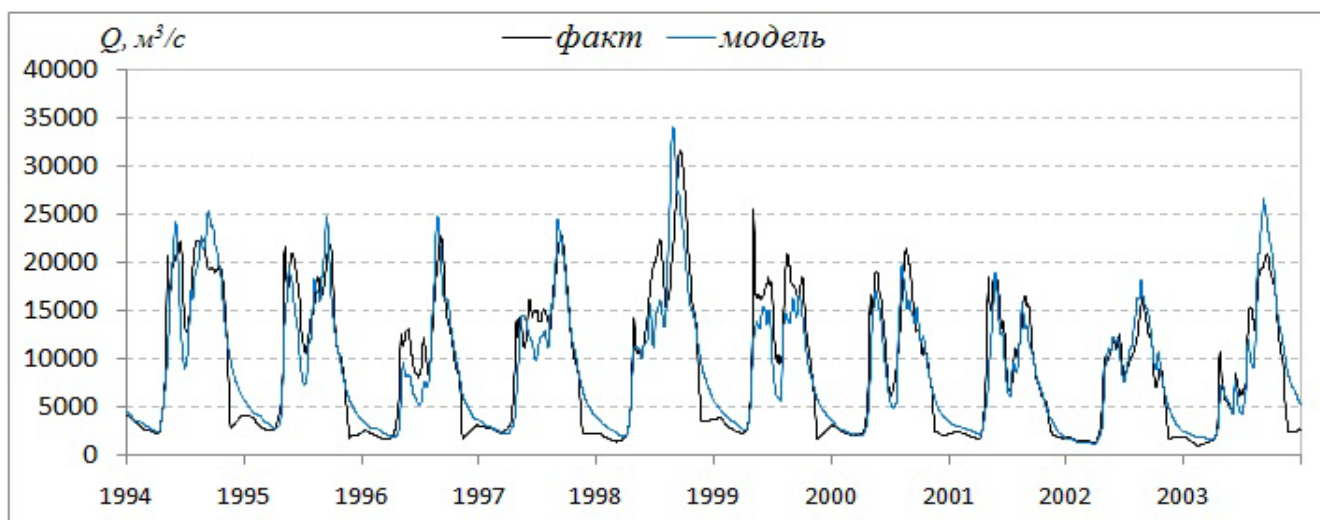


Рисунок 2.3.2.2 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе г. Комсомольск за период калибровки модели

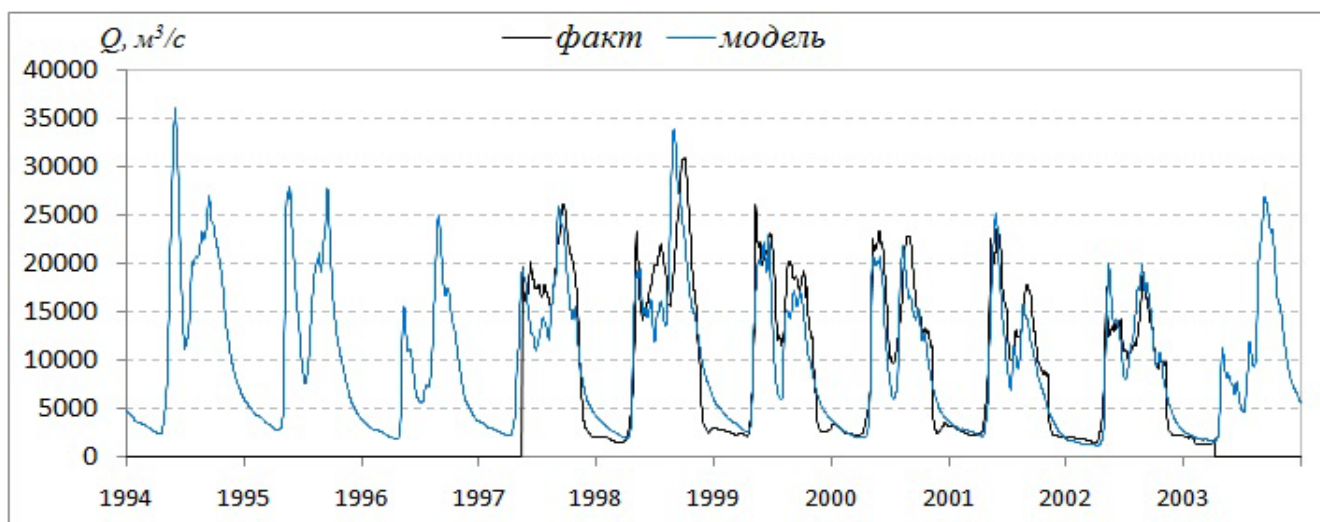


Рисунок 2.3.2.3 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Богородское за период калибровки модели

Таблица 2.3.2.2 – Значения критериев качества расчета суточного и месячного стока в бассейне р. Амур

Река	Гидрометрический пост	Площадь водосбора тыс. км <sup>2</sup>	Период калибровки 1994 – 2003 гг.			Период верификации 2004 – 2013 гг.		
			сутки		месяц	сутки		месяц
			NSE	BIAS	R <sup>2</sup>	NSE	BIAS	R <sup>2</sup>
Амур	с. Черняево	440	0.54	-7.7	0.80	0.52	-0.4	0.76
Амур	с. Кумара	478	0.60	4.6%	0.78	0.65	4.6%	0.76
Амур	с. Гродеково	726	0.61	11.3%	0.80	0.78	14.6%	0.88
Амур	г. Хабаровск	1630	0.86	1.5%	0.89	0.89	0.3%	0.89
Амур	г. Комсомольск	1730	0.85	-1.6%	0.90	0.84	0.1%	0.91
Амур	с. Богородское	1790	0.85	-5.5%	0.91	0.84	0.7%	0.91
Зея	с. Белогорье	229	0.70	-5.0%	0.78	0.86	-0.3%	0.89
Селемджа	с. Усть-Ульма	67	0.73	-17.5%	0.83	0.75	-17.5%	0.84
Гиллой	с. У перевоза	21.1	0.59	8.8	0.82	0.61	12.4	0.88
Сунгари	г. Цзямусы	528	0.83	14.3	0.80	0.63	13.5	0.66
Бурея	с. Усть-Ниман	26.5	0.77	-13.6	0.94	0.80	-6.4	0.93
Большая Бира	г. Биробиджан	7.56	0.54	-10.6%	0.74	0.67	-12.3%	0.80
Большая Уссурка	п. Вагутон	23	0.62	13.2%	0.84	0.73	10.6%	0.88
Бикин	ст. Звеньева	21.4	0.70	14.6%	0.82	0.65	10.8%	0.80
Хор	пгт Хор	24.5	0.74	-19.7%	0.86	0.70	-26.2%	0.87

Согласно приведенным выше грациям критериев качества *NSE* и *BIAS* для 13-ти из 15-ти створов гидрометрических постов получены хорошие или удовлетворительные результаты расчета суточных гидрографов, при этом лучшие результаты получены для Нижнего Амура. Для рек Хор и Селемджа результаты расчетов попали в разряд неудовлетворительных по критерию *BIAS*, однако по критерию *NSE* результаты относятся к хорошим и удовлетворительным. В целом качество расчетов оказывалось хуже для створов с малой площадью водосбора, либо створов, где фактические расходы воды восстанавливались по зависимостям  $Q=f(H)$ .

Подчеркнем, что нами выбрана жесткая оценка качества модельных расчетов, т.е. модель настраивалась не по отдельным речным бассейнам, а для всего бассейна р. Амур с одним набором параметров. Условия формирования стока в разных частях бассейна р. Амур существенно отличаются, но разработанная модель позволила учесть эту неоднородность.

Кроме того, для каждого гидрометрического поста была оценена степень тесноты связи рассчитанных и фактических объемов стока за месяц с помощью корреляционного отношения  $R^2$ , меняющегося от 1 (функциональная связь) до 0 (отсутствие связи) (табл. 2.3.2.2, рисунок 2.3.2.4).

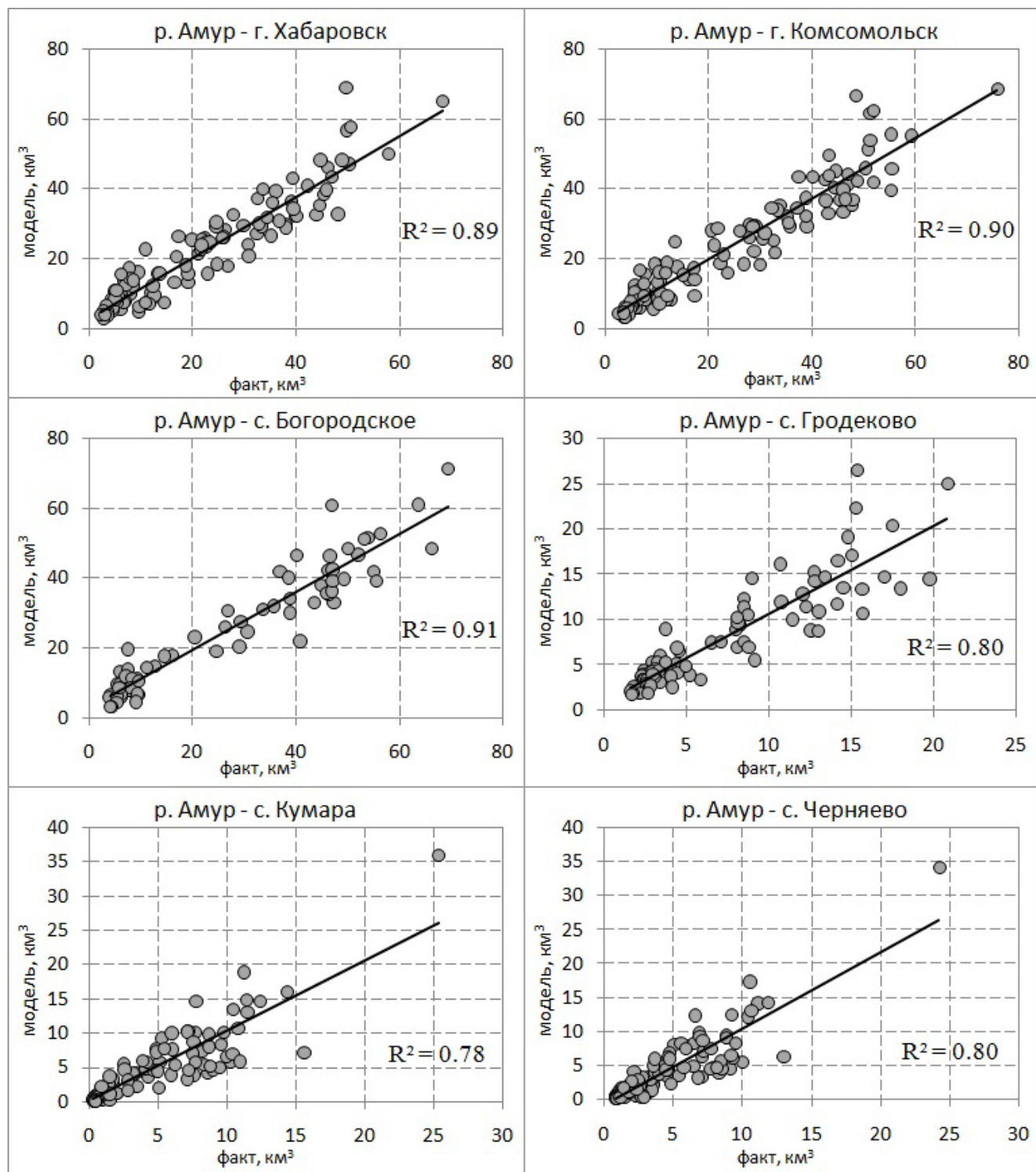


Рисунок 2.3.2.4 – Связь фактических и рассчитанных месячных объемов стока на различных гидрометрических постах в бассейне р. Амур за период калибровки

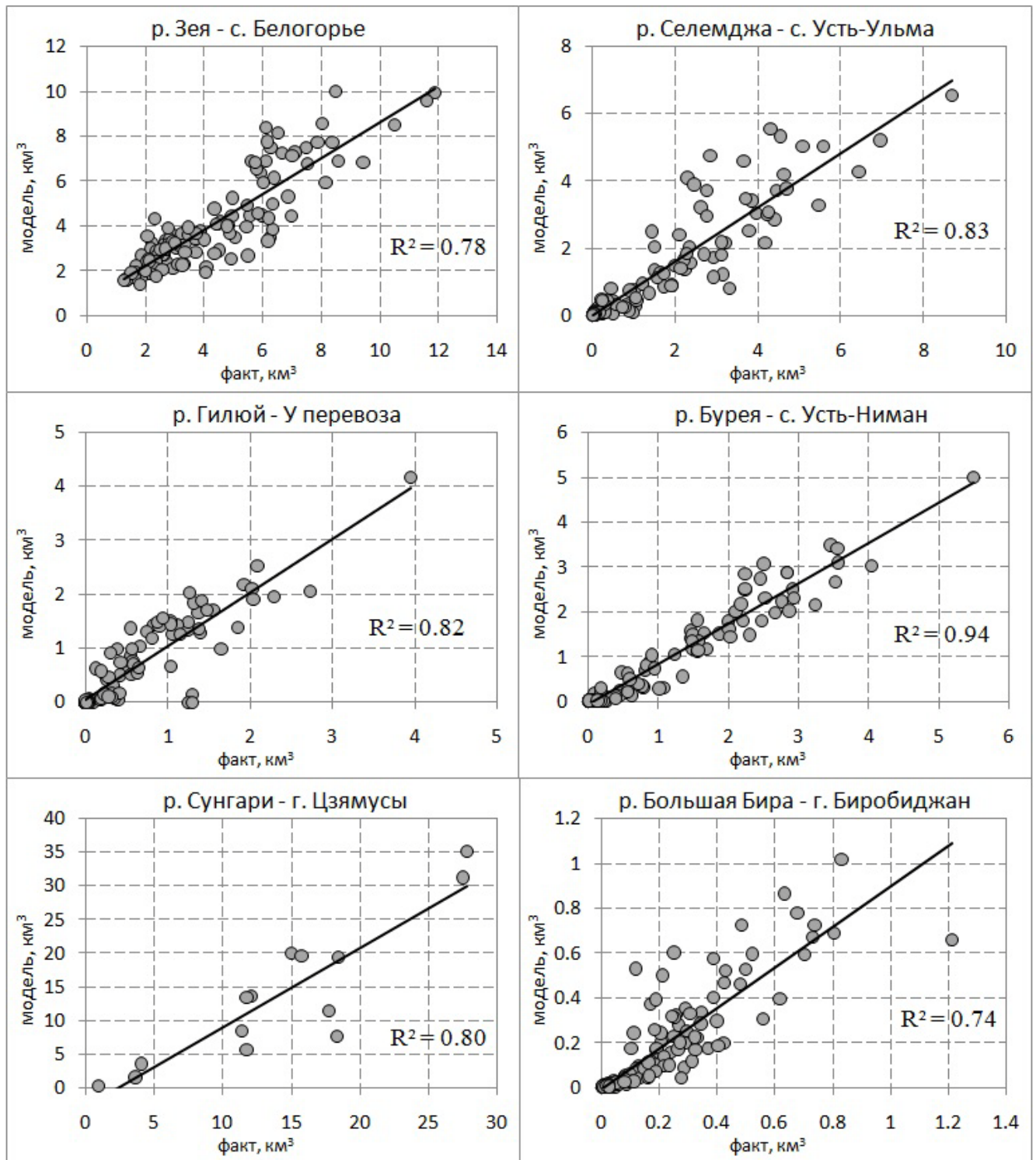


Рисунок 2.3.2.4 – продолжение



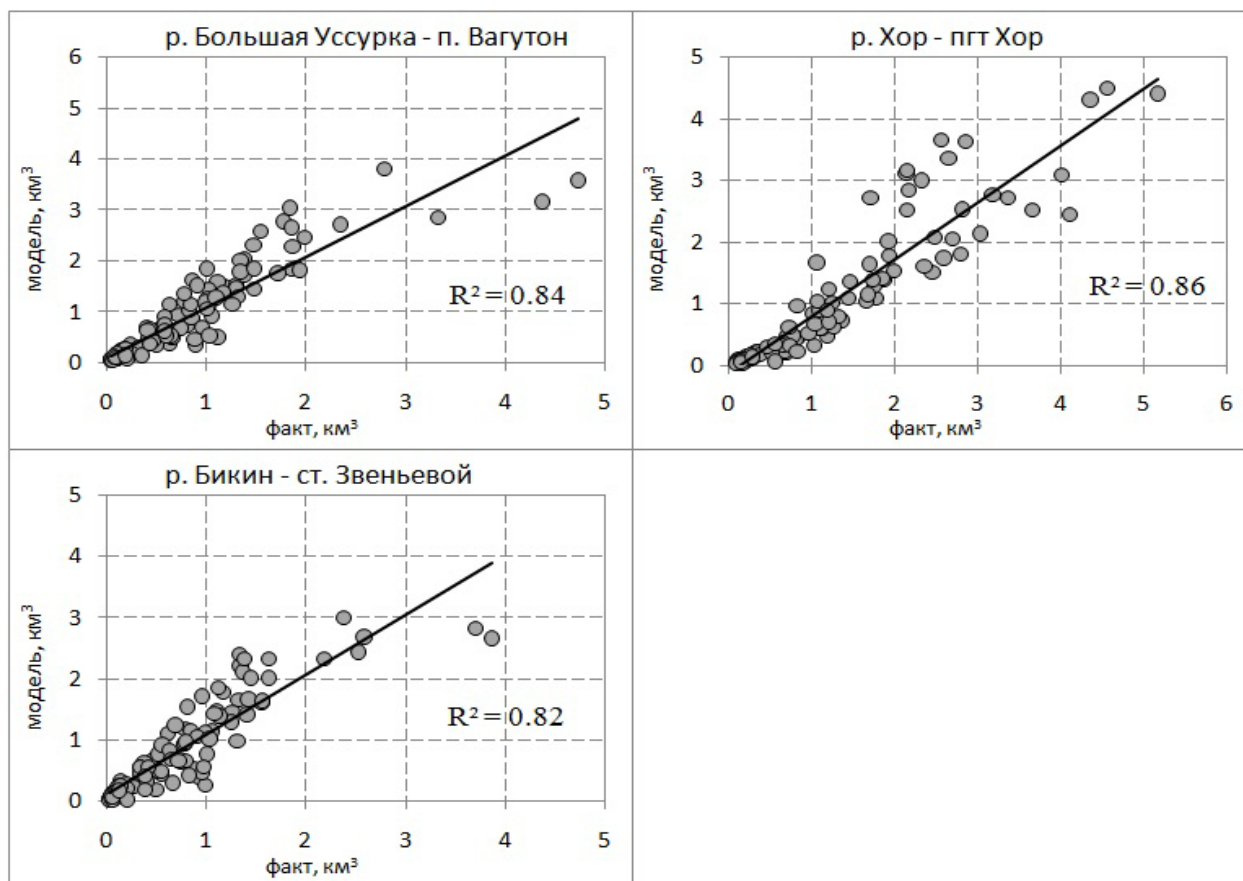


Рисунок 2.3.2.4 – продолжение

При оценках систематических отклонений модельных гидрографов от фактических показательно сравнение типовых гидрографов, характеризующих внутригодовое распределение стока за многолетний период. Среднемноголетний гидрограф получается осреднением значений среднемесячных расходов воды за многолетний период (Рисунок 2.3.2.5).

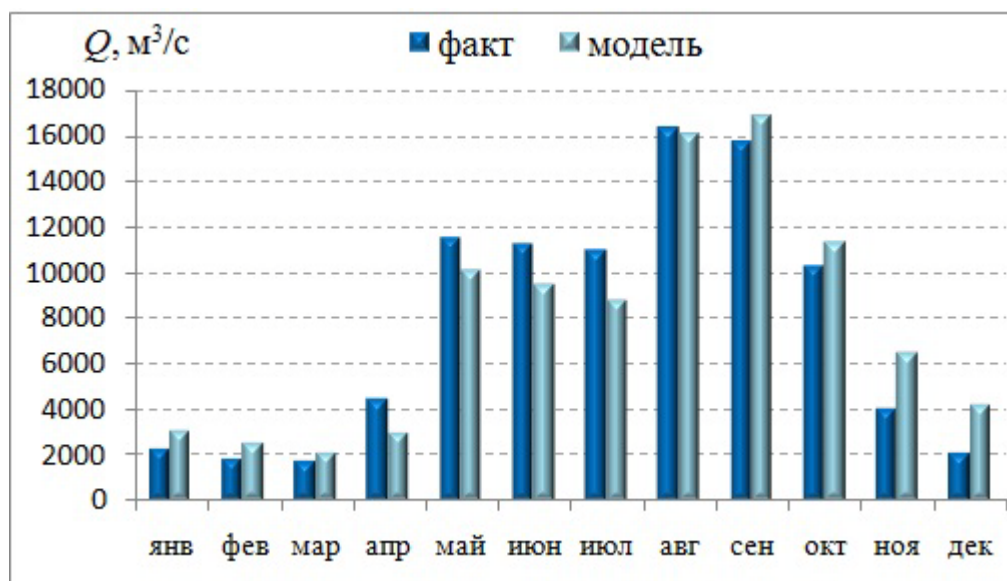


Рисунок 2.3.2.5 – Фактический и расчетный среднемноголетний гидрограф  
р. Амур в створе г. Хабаровск за 1994–2003 гг.

Анализ графиков свидетельствует о хорошем воспроизведении внутригодового хода расходов воды в замыкающих створах р. Амур за многолетний период, что подтверждает возможность использования модели для оценки характеристик водного режима рассматриваемого бассейна.

Проверка модели для бассейна р. Амур проводилась для тех же створов на независимых данных измерений за период с 2004 по 2013 гг. (рисунки 2.3.2.6 – 2.3.2.9, табл. 2.3.2.2). Остальные результаты расчетов суточных гидрографов стока рек из разных частей бассейна Амура за период верификации модели представлены в Приложении Б.

Следует отметить малую чувствительность критериев качества по отдельным гидропостам при переходе от калибровочного к проверочному периоду, что свидетельствует о высокой робастности модели.



Рисунок 2.3.2.6 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе г. Хабаровск за период верификации модели

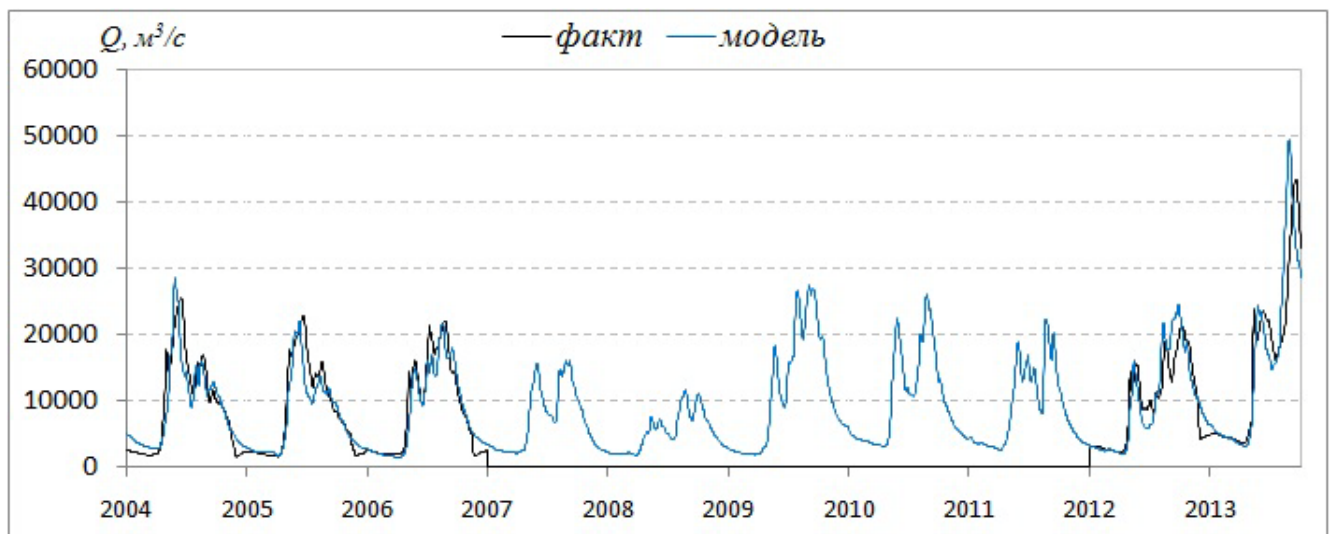


Рисунок 2.3.2.7 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе г. Комсомольск за период верификации модели

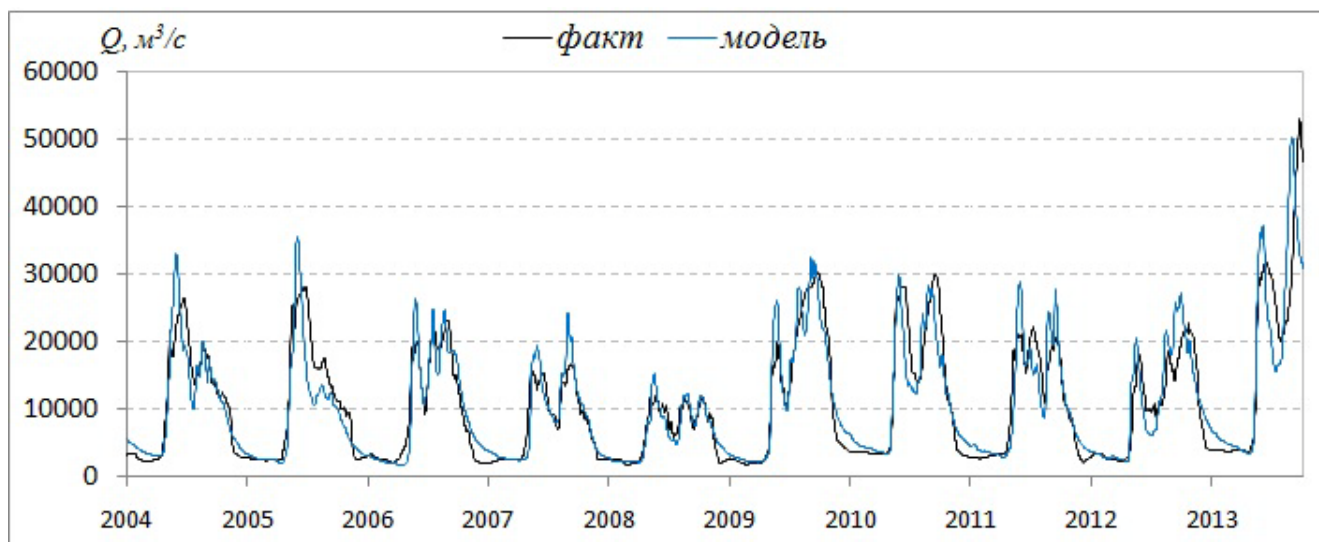


Рисунок 2.3.2.8 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Богородское за период верификации модели

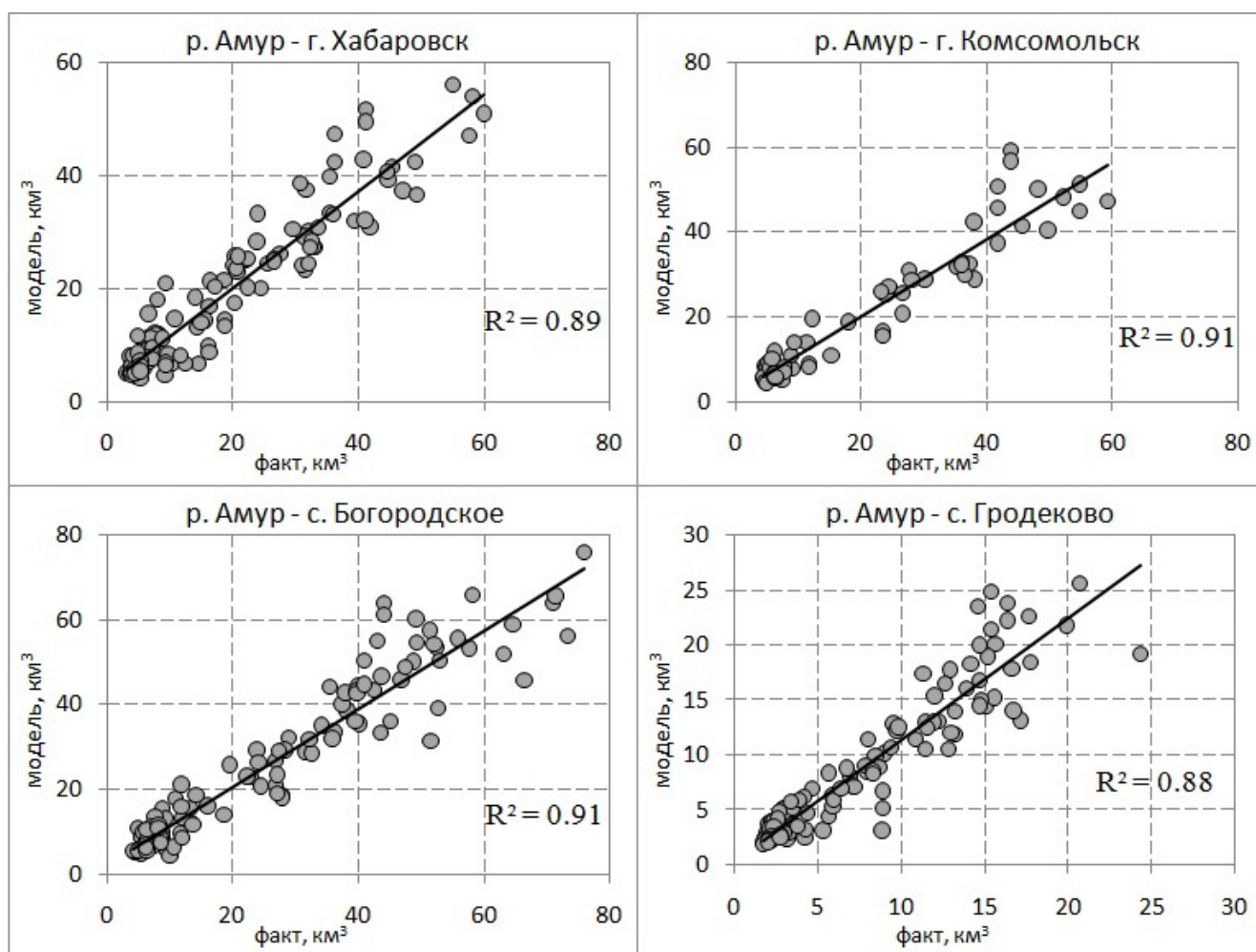


Рисунок 2.3.2.9 – Связь фактических и рассчитанных месячных объемов стока на различных гидрометрических постах в бассейне р. Амур за период верификации



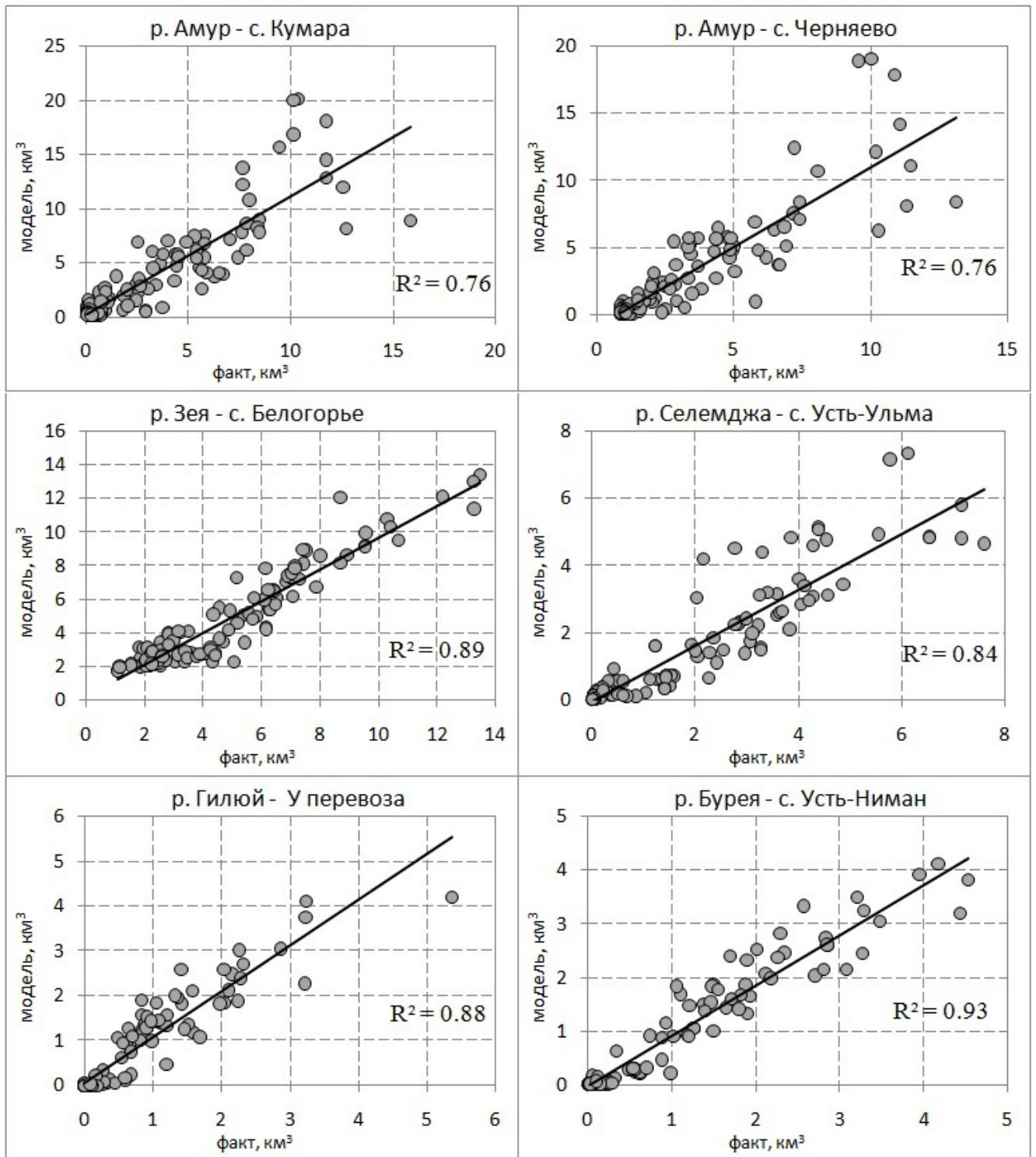


Рисунок 2.3.2.9 – продолжение

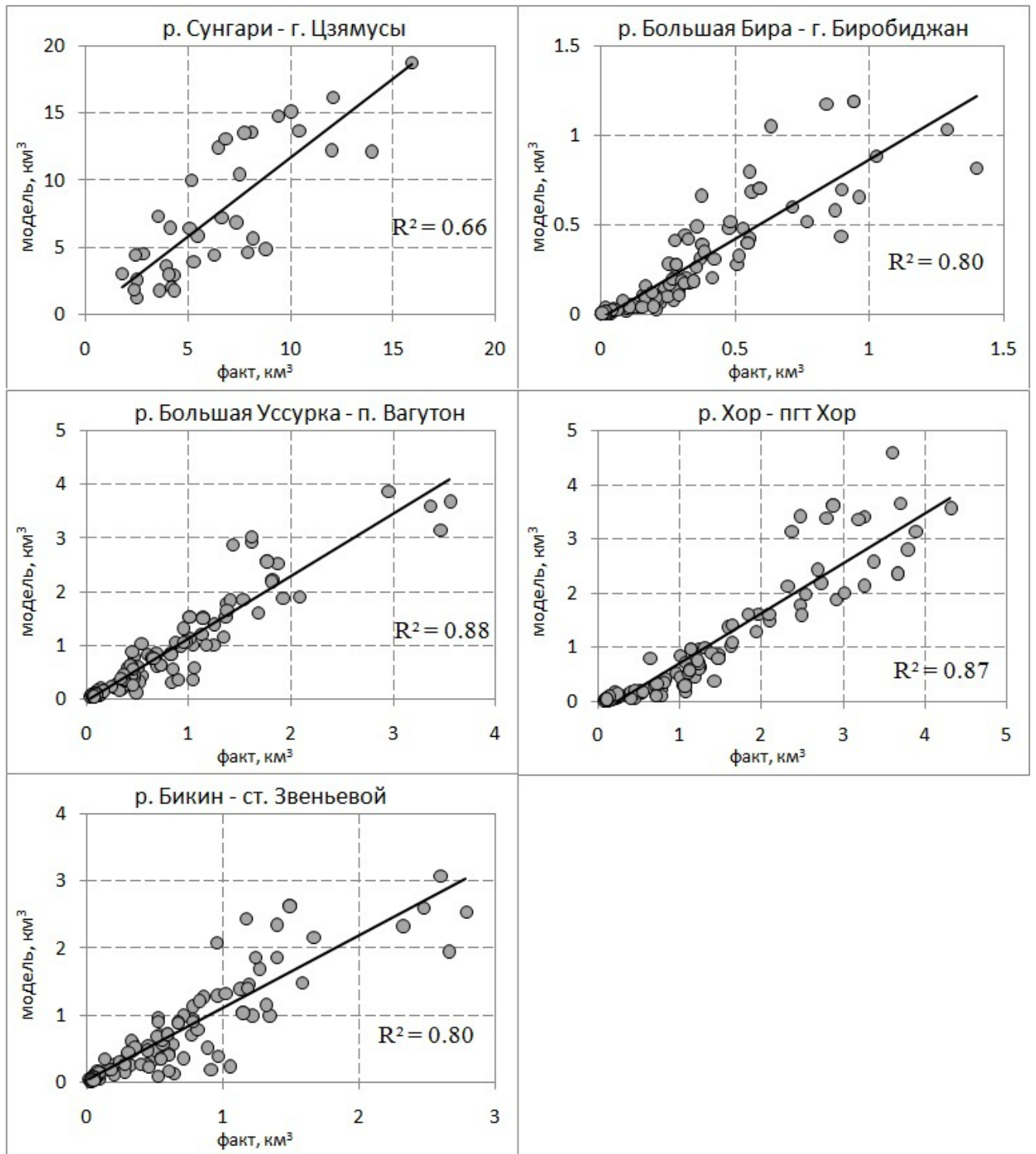


Рисунок 2.3.2.9 – продолжение

Для Нижнего Амура качество расчета не зависит от водности года: с высокой точностью рассчитывается гидрограф как экстремально высокого по водности 2013 г., так и маловодного 2008 г. Дополнительно была проведена оценка качества расчета максимальных расходов воды и объемов стока за паводковый период в течение июля-сентября в створе г. Хабаровск за период 1994-2013 гг. (рисунки 2.3.2.10, 2.3.2.11). При этом коэффициент детерминации для максимальных расходов воды составил 0.91, а для объемов стока за июль-сентябрь 0.93.

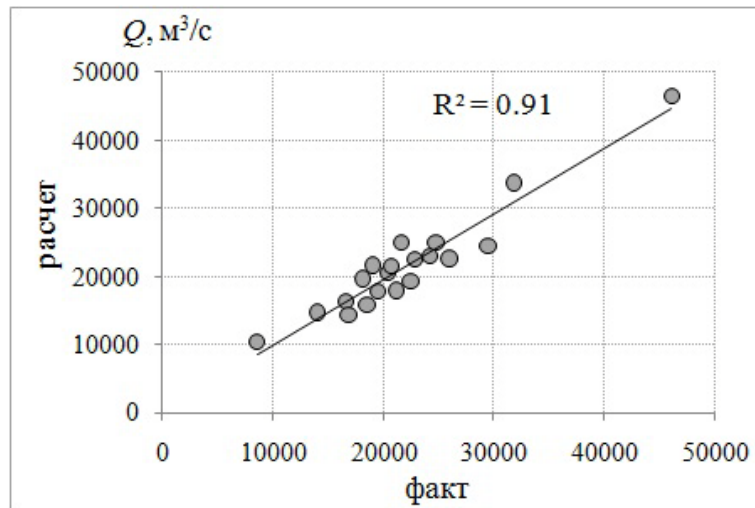


Рисунок 2.3.2.10 – Связь фактических и рассчитанных максимальных в году расходов воды в створе г. Хабаровск за период 1994-2013 гг.

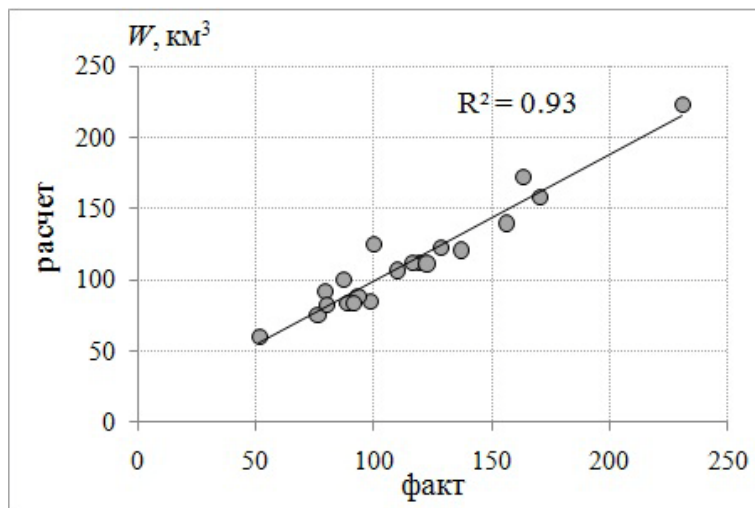


Рисунок 2.3.2.11 – Связь фактических и рассчитанных объемов стока июля-сентября в створе г. Хабаровск за период 1994-2013 гг.

Кроме указанных створов гидрологических постов получены результаты моделирования притока воды к двум крупнейшим водохранилищам в бассейне Амура – Зейскому и Бурейскому. Суточные данные о притоке воды в водохранилища, рассчитанные как сумма расходов, измеренных на гидрометрических постах на притоках, расположенных выше водохранилища, с учетом бокового притока на неосвещенной данными гидрометрических наблюдений площади по постам-аналогам, получены из режимных журналов Росводресурсов. На рисунке 2.3.2.12 представлены результаты калибровки модели для Зейского водохранилища за многолетний период с 1994 по 2003 гг. ( $NSE=0.70$ ,  $BIAS=-0.8\%$ ) и верификации с 2004 по 2013 гг. ( $NSE=0.81$ ,  $BIAS=0.8\%$ ). Для Бурейского водохранилища калибровка параметров выполнялась для периода с 2005 г. (после наполнения Бурейского водохранилища) по 2013 г. ( $NSE=0.85$ ,  $BIAS=-0.6\%$ ) (Рисунок 2.3.2.13). По грациям критериев качества  $NSE$  и  $BIAS$

результаты моделирования притока воды к Зейскому и Бурейскому водохранилищам соответствуют хорошим.

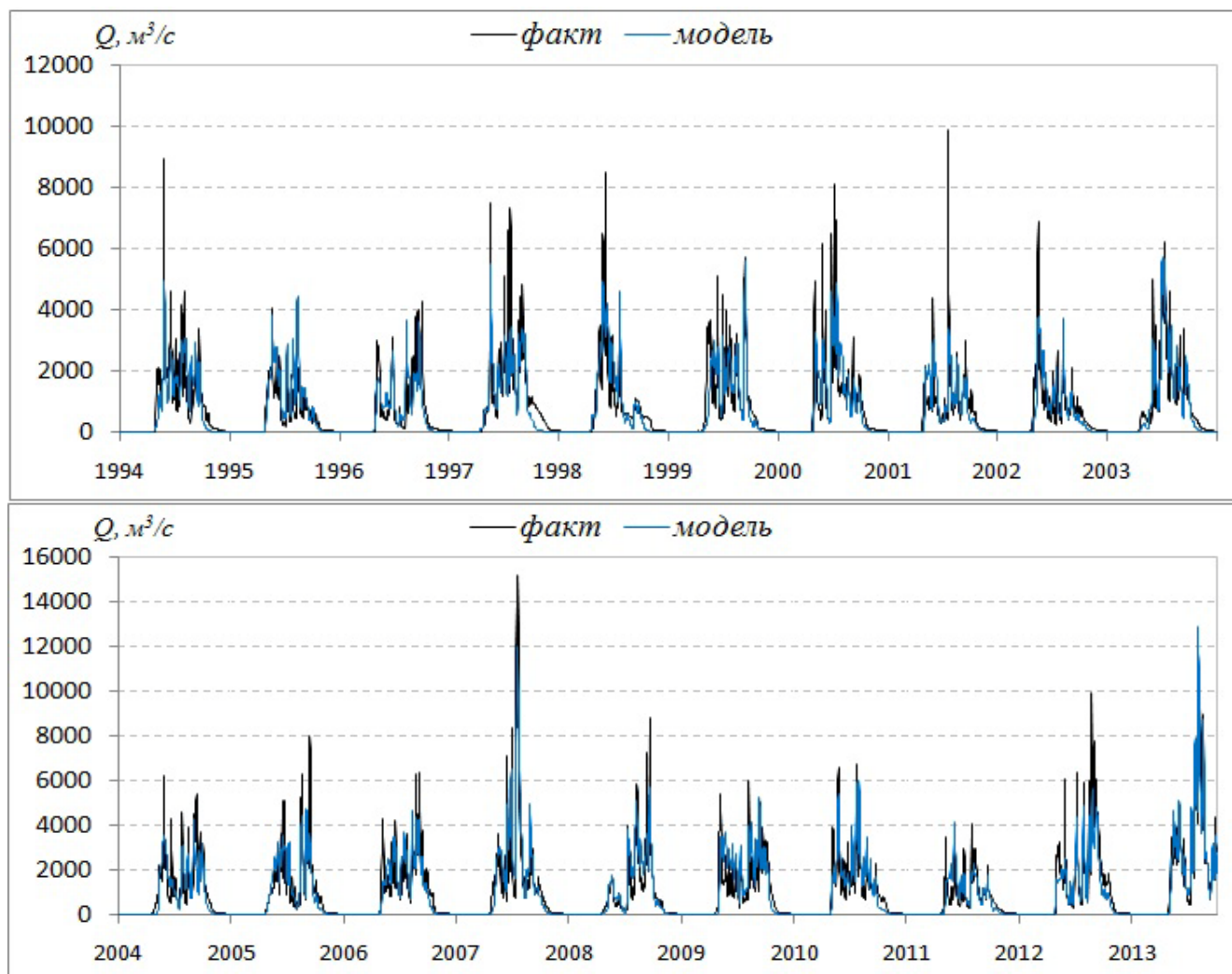


Рисунок 2.3.2.12 – Фактический и рассчитанный суточный боковой приток  
в Зейское водохранилище

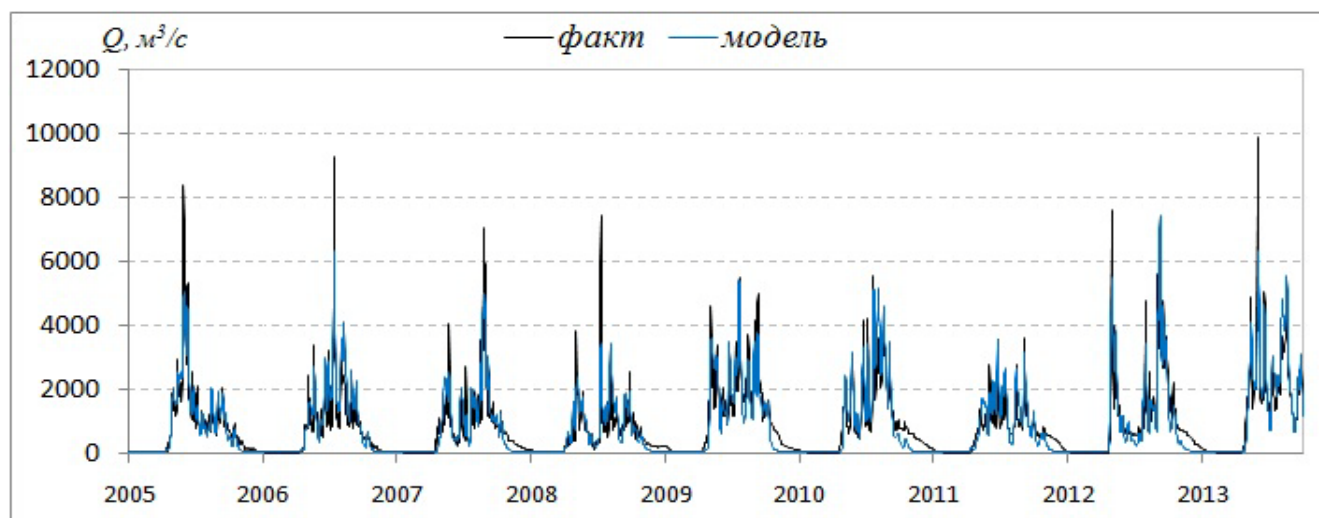


Рисунок 2.3.2.13 – Фактический и рассчитанный суточный боковой приток  
в Бурейское водохранилище



Коэффициент детерминации линейной связи рассчитанных и фактических объемов квартального притока воды составил 0.94 за период калибровки и 0.93 за период верификации для Зейского (Рисунок 2.3.2.14) и 0.95 для Бурейского водохранилищ (Рисунок 2.3.2.15).

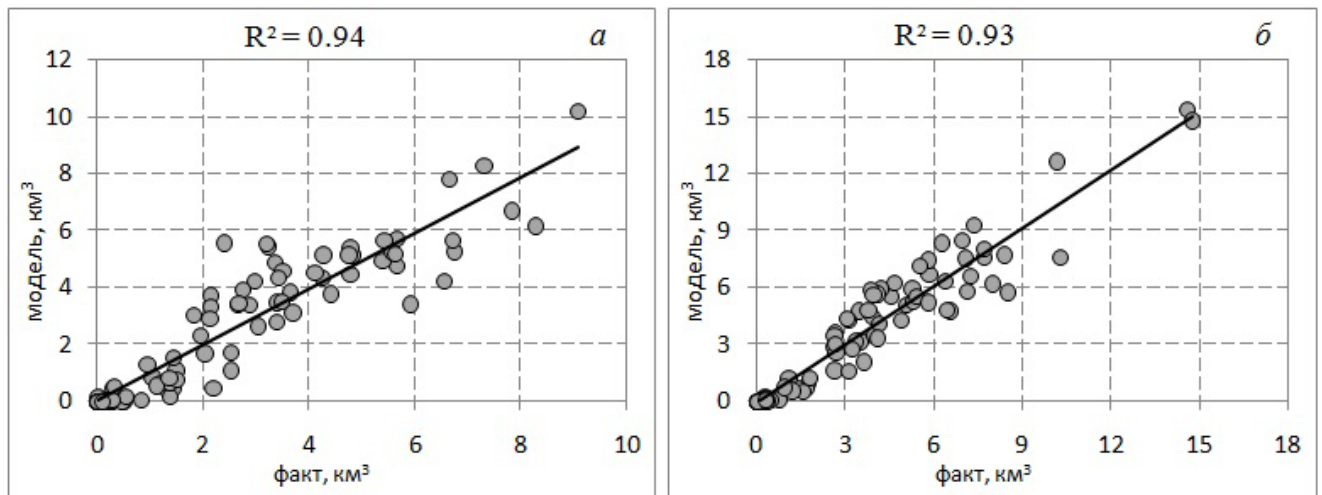


Рисунок 2.3.2.14 – Связь фактических и рассчитанных квартальных объемов бокового притока в Зейское водохранилище за период калибровки (а) и верификации (б)

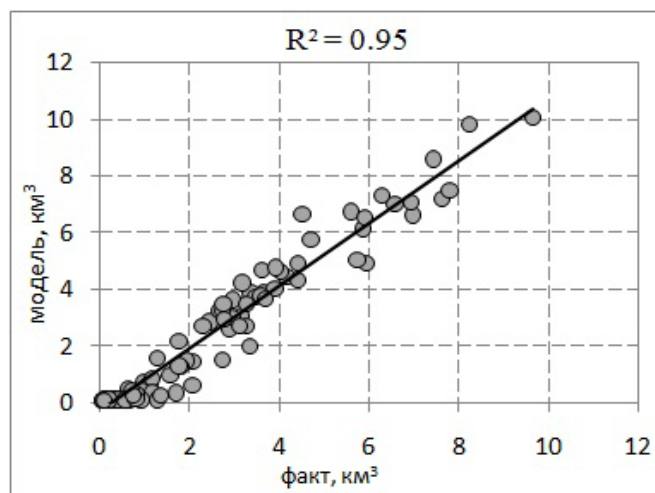


Рисунок 2.3.2.15 – Связь фактических и рассчитанных квартальных объемов бокового притока в Бурейское водохранилище

## 2.4 Пространственно-временной анализ условий формирования наводнения 2013 г. в бассейне р. Амур по результатам моделирования

Дождевой паводок, сформировавшийся в июле – сентябре 2013 г. на реках бассейна р. Амур, вызвал наводнение, которое охватило огромные территории российского Дальнего Востока и северо-востока Китая и стало одним из наиболее масштабных стихийных бедствий XXI века по продолжительности, площади распространения, числу пострадавших и экономическому ущербу. Практически весь бассейн Амура оказался охваченным разрушительным наводнением, продолжавшимся более двух месяцев. В Амурской,

Еврейской автономной областях, Хабаровском крае были затоплены десятки населенных пунктов. В наиболее крупных из них – Хабаровске, Комсомольске-на-Амуре – подъем воды превысил максимальный уровень за период инструментальных наблюдений.

По данным МЧС России [Катастрофическое наводнение..., 2013] на российской части бассейна Амура было затоплено 366 населенных пунктов с общим числом жителей более 170 тыс. человек, более 13 тыс. жилых домов, 504 социальных, 14 сельскохозяйственных, 34 гидротехнических и 10 опасных объектов, около 22.5 тыс. дачных и приусадебных участков, более 600 тыс. га сельхозугодий, более 1.7 тыс. км автодорог, 185 мостов, свыше 500 км и 5 тыс. опор ЛЭП. Десятки тысяч людей были эвакуированы, многие потеряли жилье и имущество. Общая сумма ущерба от наводнения на российской территории превышает 500 млрд. рублей или 0.68% ВВП страны. Однако в работе Б.Н. Порфирьева [*Порфирьев*, 2015] совокупные экономические издержки, обусловленные последствиями наводнения, оценены в 216 млрд. рублей. Не будет преувеличением утверждать, что для нашей страны это наводнение стало катастрофой национального масштаба. К счастью, удалось избежать человеческих жертв, в том числе благодаря оперативному мониторингу и прогнозированию формирования и прохождения экстремального паводка, позволившим вовремя организовать противопаводковые мероприятия. Не менее значительный ущерб из-за большей численности и плотности населения был причинен северо-восточным провинциям КНР, где от наводнения пострадало 5 млн. человек и не обошлось без человеческих жертв. Прямой ущерб оценивается не менее чем в 2.5 млрд. долларов США [*Симонов*, 2013], а общий ущерб – в 15 млрд. долларов США.

Исследованию причин и факторов, приведших к формированию этого катастрофического явления, посвящено много публикаций, но выводы большей части этих работ основаны на анализе данных гидрометеорологических измерений в бассейне в период прохождения паводка [*Крыжов, Вильфанд*, 2014; *Фролов, Георгиевский*, 2014; *Махинов и др.*, 2014]. В этих и других работах показано, что наводнение 2013 г. в бассейне р. Амур сформировалось в результате чрезвычайно редкого сочетания неблагоприятных гидрометеорологических факторов: формирование высотной фронтальной зоны, вдоль которой в течение двух месяцев непрерывно перемещались глубокие, насыщенные влагой циклоны, и блокирующей области высокого давления над северо-западом Тихого океана, препятствующей перемещению этих циклонов с континента в сторону Охотского моря. Результатом этих синоптических макропроцессов стало формирование аномальных по объему, продолжительности и площади распространения дождевых осадков в бассейнах крупнейших рек региона. В некоторых частях бассейна р. Амур слой осадков, выпавших за июль – август 2013 г., превысил годовую норму.

Аналогичные синоптические процессы не раз становились основной причиной катастрофических наводнений в разных районах Земного шара. Яркий недавний пример – формирование гигантской блокирующей области высокого давления, принесшей аномальную жару на Европейскую часть России и охватившей также Казахстан и северо-запад Китая летом 2010 г., что привело к выпадению экстремально высоких и продолжительных дождевых осадков и, как следствие, к катастрофическому наводнению на р. Инд, охватившему территорию почти 1 млн. км<sup>2</sup> и унесшему в Пакистане жизни более 2000 человек [Lau, Kim, 2012]. Существует мнение, что возникновение подобных аномальных синоптических явлений связано с происходящими изменениями климата, сопровождающимися увеличением количества и мощности циклонов в Северном полушарии, ростом повторяемости периодов с интенсивными осадками, с одной стороны, и увеличением масштаба засух, с другой [IPCC, 2007].

Другой важнейший фактор произошедшего наводнения на Амуре – повышенное влагосодержание почвы к началу паводкового сезона в результате снежной холодной зимы 2012–2013 гг., приведшей к формированию мощного снежного покрова в пределах бассейна и поглощению талой воды почвогрунтами. Насыщение водой почвогрунтов привело к критическому снижению их впитывающей способности. В результате огромные массы дождевой воды, обрушившиеся начиная с июля на склоны речных долин, с минимальными потерями на впитывание в почву стекали в речную сеть, что привело к одновременному формированию паводковых волн на притоках и основном русле и, соответственно, резкому росту расходов и уровней воды в реках бассейна. Гребень паводка постепенно продвигался от Благовещенска до Хабаровска с 16 августа по 4 сентября. Обеспеченности максимальных расходов и уровней воды на притоках Амура не были выдающимися и составили от 2 до 7%, а объемы паводка оказались экстремально высокими [Шалыгин, 2015].

Продолжая аналогии по факторам формирования с недавними масштабными наводнениями в других регионах мира, следует упомянуть катастрофическое (50 человек погибших, экономический ущерб свыше 15 млрд. долларов) наводнение в бассейне Миссисипи летом 1993 г. Увеличению высоты дождевого паводка, сформировавшего это наводнение, в значительной степени способствовало высокое увлажнение почвогрунтов на огромной территории вследствие экстремально высоких дождей осени 1992 г. и аномально снежной зимы 1992–1993 гг. [National Oceanic..., 1994].

Доля стока р. Сунгари в объеме паводка за июль-сентябрь 2013 г. составила 29% стока Амура в створе Хабаровска, р. Зеи – 26%, Верхнего Амура – 20%, р. Уссури – 16%, р. Буреи – 6%. Всего величина стока Амура у Хабаровска в 2013 г. составила 445 км<sup>3</sup> (максимальное значение за период наблюдений), а объем дождевого паводка в июле-сентябре 230 км<sup>3</sup>.

Для долины в нижнем течении Амура характерно чередование сужений и пойменно-равнинных расширений. Проходя через эти участки долины, паводочная волна, существенно трансформируется. Также необходимо отметить, что на Нижнем Амуре происходит аккумуляция наносов со скоростью до 2 мм/год, что во время наводнений становится дополнительным негативным фактором [Махинов, 2006]. Помимо комплекса природных факторов на формирование катастрофического наводнения 2013 г. оказала влияние антропогенная деятельность. Например, существенное снижение пропускной способности русла в районе Хабаровска в результате искусственного перераспределения стока между рукавами, что способствовало повышению уровней воды в 2013 г. до экстремальных значений [Болгов и др., 2015]. В результате на многих участках речной сети уровень воды превысил максимальные величины, зарегистрированные за период инструментальных наблюдений (табл. 2.4). На протяжении Среднего и Нижнего Амура уровень затопления на 1–2.5 м превысил отметки опасного явления (ОЯ), а продолжительность стояния воды над этой отметкой достигала почти 1.5 месяцев.

Таблица 2.4 – Отметки стояния высоких вод и продолжительность затопления в период прохождения паводка 2013 г. на р. Амур

Гидрометрический пост	Отметка ОЯ над нулем поста, см	Максимальный наблюдаемый уровень над нулем поста, см	Дата	Исторический максимум, см и год	Начало ОЯ	Конец ОЯ	Продолжительность, сут
г. Благовещенск	800	822	16,17.08	895 (1958)	14.08	24.08	11
с. Константиновка	750	924	18,19.08	930 (1984)	05.08	30.08	26
с. Поярково	750	833	17,18.08	875 (1928)	10.08	28.08	19
с. Иннокентьевка	930	1083	20.08	1090 (1928)	12.08	31.08	20
с. Пашково	1600	1802	24.08	1803 (1984)	15.08	02.09	19
с. Ленинск	850	1044	29-31.08	935 (1984)	07.08	13.09	38
г. Хабаровск	600	808	03,04.09	642 (1897)	16.08	18.09	34
с. Троицкое	450	610	08-10.09	502 (1951)	19.08	26.09	39
г. Комсомольск	650	912	12.09	701 (1959)	25.08	03.10	40



Максимальный за период наблюдений расход воды, измеренный специалистами Государственного гидрологического института и Дальневосточного УГМС при прохождении пика паводка в створе Хабаровска 4 сентября, составил  $46000 \text{ м}^3/\text{с}$ , что почти вдвое выше среднегогодового максимального расхода в этом створе ( $24700 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Повторяемость такого расхода оценивается как один раз в 200-250 лет [Фролов, Георгиевский, 2014].

Первая попытка анализа особенностей экстраординарного наводнения 2013 г. на основе модели его формирования была предпринята в нашей совместной работе [Данилов-Данильян и др., 2014]. С помощью модели формирования речного стока и одномерной гидродинамической модели MIKE 11 были показаны возможности воспроизведения хода расходов и уровней воды на участке Среднего Амура в 850 км в период прохождения паводка 2013 г., а также для оценки влияния сбросов Зейского водохранилища на уровеньный режим Амура ниже впадения р. Зеи.

Ниже рассмотрены результаты применения описанной в предыдущем разделе модели формирования речного стока для воспроизведения условий формирования паводка 2013 г. и расчета гидрографов паводкового стока на всем водосборе р. Амур. Моделирование паводка 2013 г. осуществлялось при тех же значениях параметров модели, которые были определены при ее калибровке (Рисунок 2.4.1).

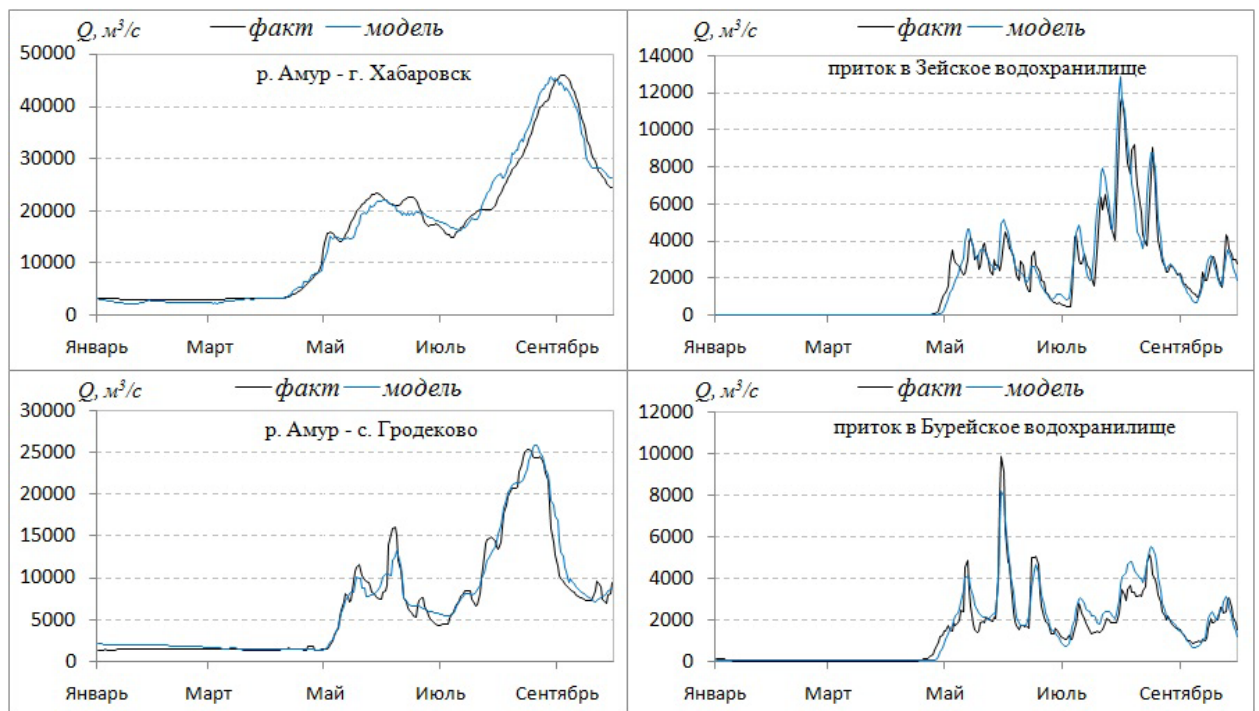


Рисунок 2.4.1 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы в различных створах за 2013 г.

На рисунках 2.3.2.1–2.3.2.3, 2.3.2.6–2.3.2.8 и в Приложении Б сравниваются рассчитанные и фактические гидрографы в разных створах речной сети, в том числе за 2013 г. По результатам моделирования получено хорошее соответствие рассчитанных и фактических суточных гидрографов стока 2013 г. Значения критерия  $NSE$  для отдельных створов составили:

г. Хабаровск 0.92, г. Комсомольск 0.77, с. Богородское 0.72, с. Кумара 0.79, с. Гродеково 0.82, с. Белогорье 0.89, с. Усть-Ульма 0.78, с. У перевоза 0.83, с. Усть-Ниман 0.75, г. Цзямусы 0.76, пгт Хор 0.64, п. Вагутон 0.85, ст. Звеньевой 0.79, приток к Зейскому водохранилищу 0.90, приток к Бурейскому водохранилищу 0.87. Коэффициент детерминации связи фактических и рассчитанных максимальных расходов по различным гидропостам составил 0.99 (Рисунок 2.4.2).

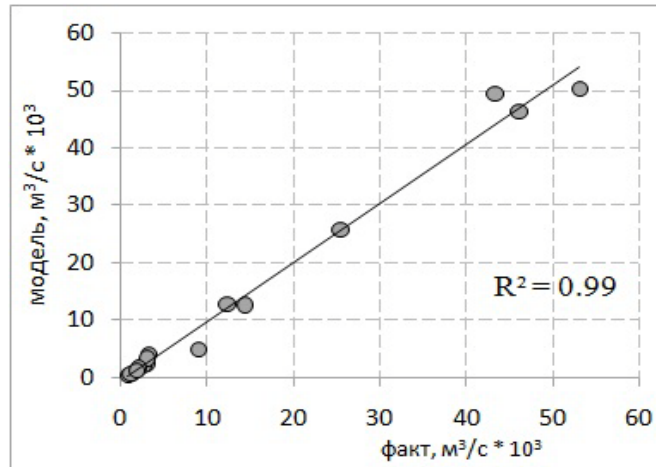


Рисунок 2.4.2 – Связь фактических и рассчитанных максимальных расходов воды рек бассейна Амура в 2013 г.

С помощью разработанной модели формирования стока Амура появляется возможность более детального анализа условий формирования паводка 2013 г., чем это может быть сделано по имеющимся данным наблюдений за стокообразующими факторами, поскольку на большей части бассейна эти наблюдения не проводятся. По результатам моделирования были построены карты пространственного распределения рассчитанных значений запасов воды в снежном покрове и влажности почвы, а также распределения речного стока в бассейне Амура на разные даты в период формирования паводка 2013 г. На основе этих карт, а также карты измеренных осадков было оценено влияние трех основных природных факторов на формирование критического состояния водосбора к началу паводка и экстремального стока в период его прохождения [Калугин, 2015]. Первый фактор – высокая насыщенность почвогрунтов водой на большей части бассейна осенью 2012 г. в результате значительного количества осадков. Для демонстрации этого по состоянию на первое число каждого месяца были построены карты отношения рассчитанных запасов воды в верхнем полуметровом слое почвы к наименьшей полевой влагоемкости каждого типа почв, характеризующего степень насыщения водой почвогрунтов. На рисунке 2.4.3 темно-синему цвету соответствуют переувлажненные почвогрунты, а синему – близкие к насыщению. Результаты расчетов показали, что на большей части водосбора почвогрунты в период весеннего половодья были близки к насыщению, а максимум почвенной влаги в бассейне сформировался к началу мая 2013 г. (Рисунок 2.4.4).

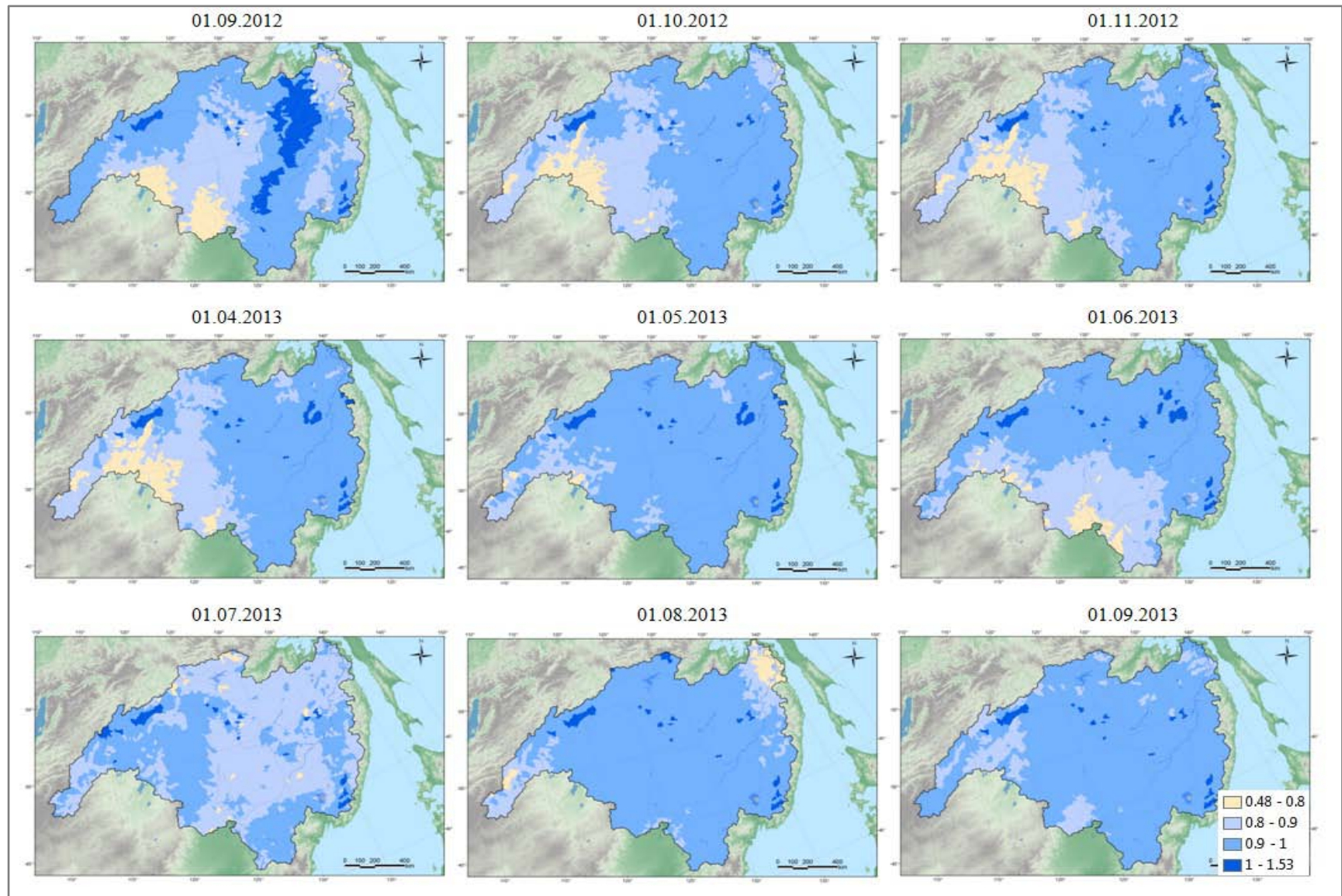


Рисунок 2.4.3 – Отношение рассчитанных запасов воды в верхнем полуметровом слое почвы к наименьшей полевой влагоемкости почв в бассейне р. Амур на 1-ое число каждого месяца 2013 г.

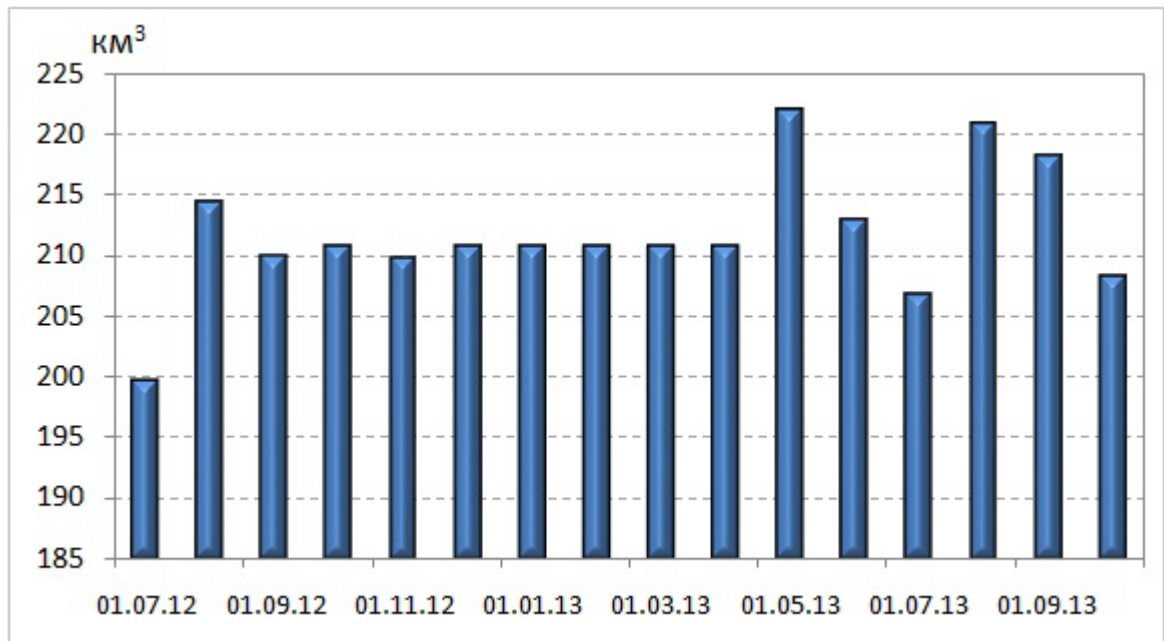


Рисунок 2.4.4 – Рассчитанный объем запасов воды в верхнем полуметровом слое почвы в бассейне р. Амур на 1-ое число каждого месяца 2013 г.

Во многом это стало результатом снежной зимы 2012–2013 гг., приведшей к формированию максимума запасов воды в снежном покрове к началу апреля 2013 г. (Рисунок 2.4.5, 2.4.6).



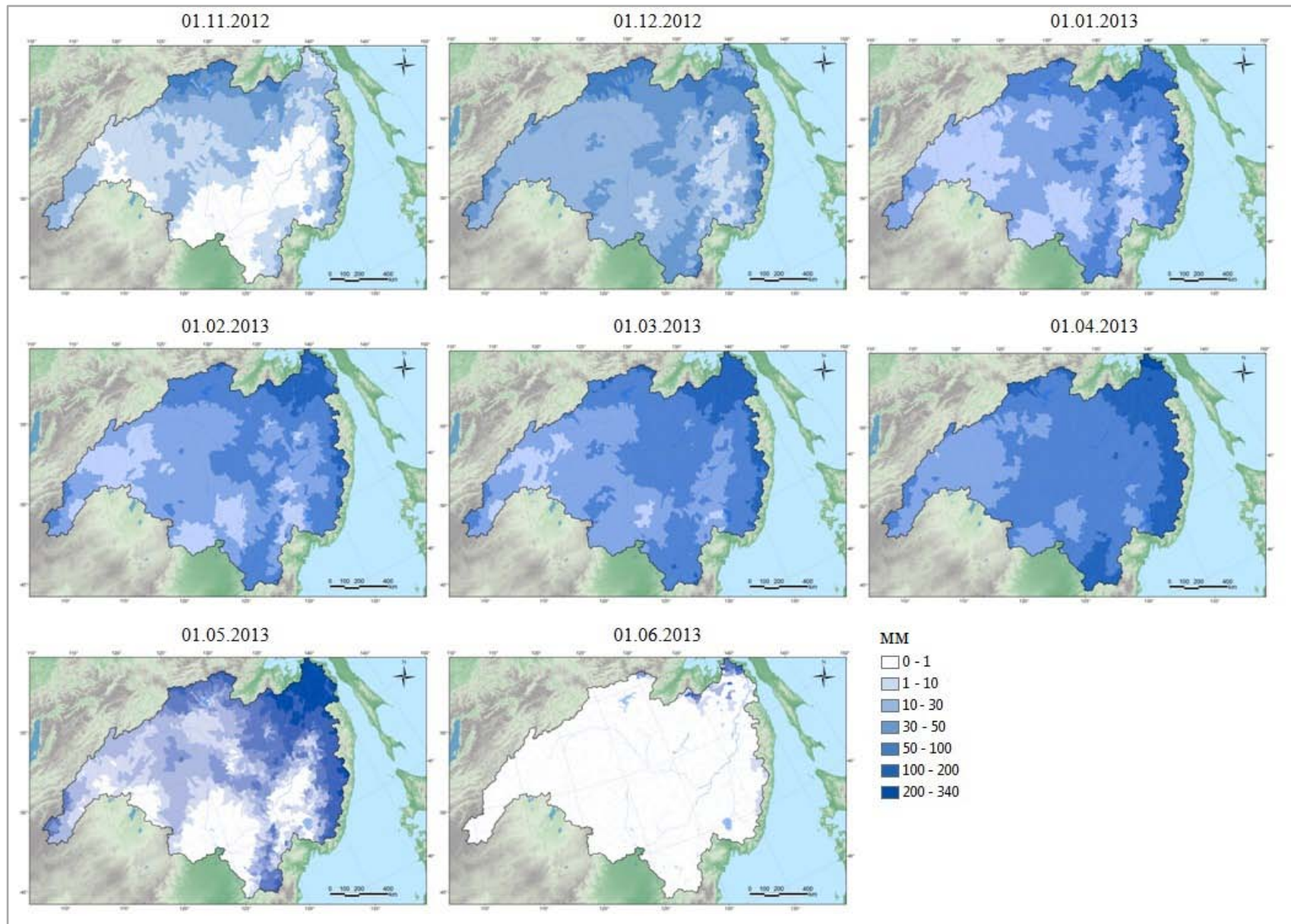


Рисунок 2.4.5 – Распределение рассчитанных запасов воды (мм) в снежном покрове в бассейне р. Амур на 1-ое число каждого месяца 2013 г.

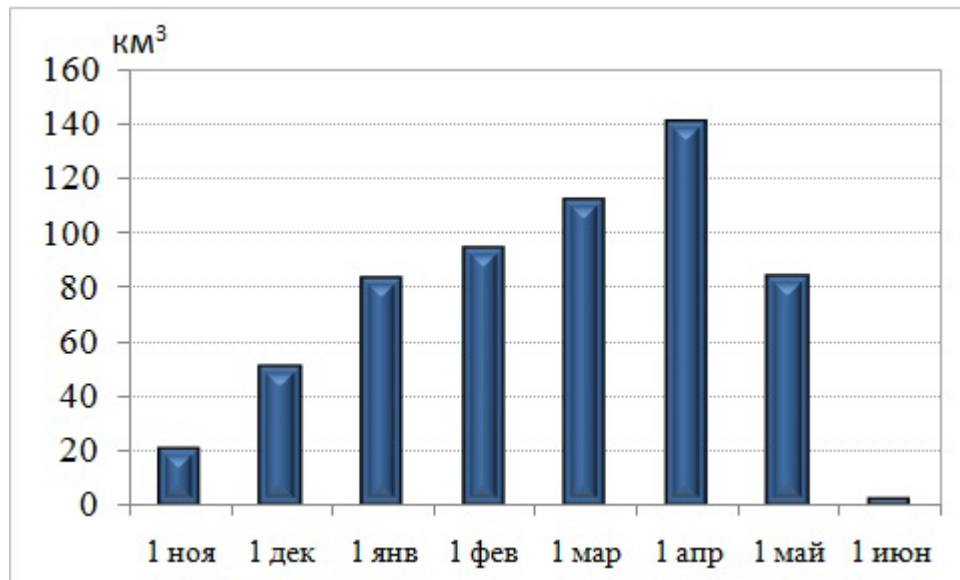


Рисунок 2.4.6 – Рассчитанный объем запасов воды в снежном покрове для бассейна р. Амур на 1-ое число каждого месяца 2013 г.

Кроме того, для весны 2013 г. был характерен более поздний переход средней по бассейну температуры воздуха через 0°C. Если в среднем за последние 20 лет это наблюдалось 3 апреля, то в 2013 г. – 20 апреля. Соответственно, впитывающая способность на фоне насыщенных водой почвогрунтов была затруднена, что привело к формированию на водосборе позднего и довольно мощного половодья, а также уменьшению естественной регулирующей емкости бассейна Амура перед началом летнего дождливого периода.

Главный фактор, обусловивший катастрофическое наводнение, – уникальная синоптическая обстановка, которая сложилась над территориями российского Дальнего Востока и северо-востока Китая. Так, летние осадки стали следствием серии мощных полярно-фронтальных циклонов, начиная уже со второй половины июня. Все циклоны имели крайне редкую траекторию – приходя из континентальных районов, они перемещались вдоль Амура. Это объясняется аномальным углублением муссонной депрессии над сушей и смещением на северо-запад Тихого океана отрога блокирующего гавайского антициклона на 10-15° [Семенов и др., 2014]. В результате на многих метеостанциях месячные нормы осадков (по данным Гидрометцентра за 1961-1990 гг.) были превышены в несколько раз (Рисунок 2.4.7).

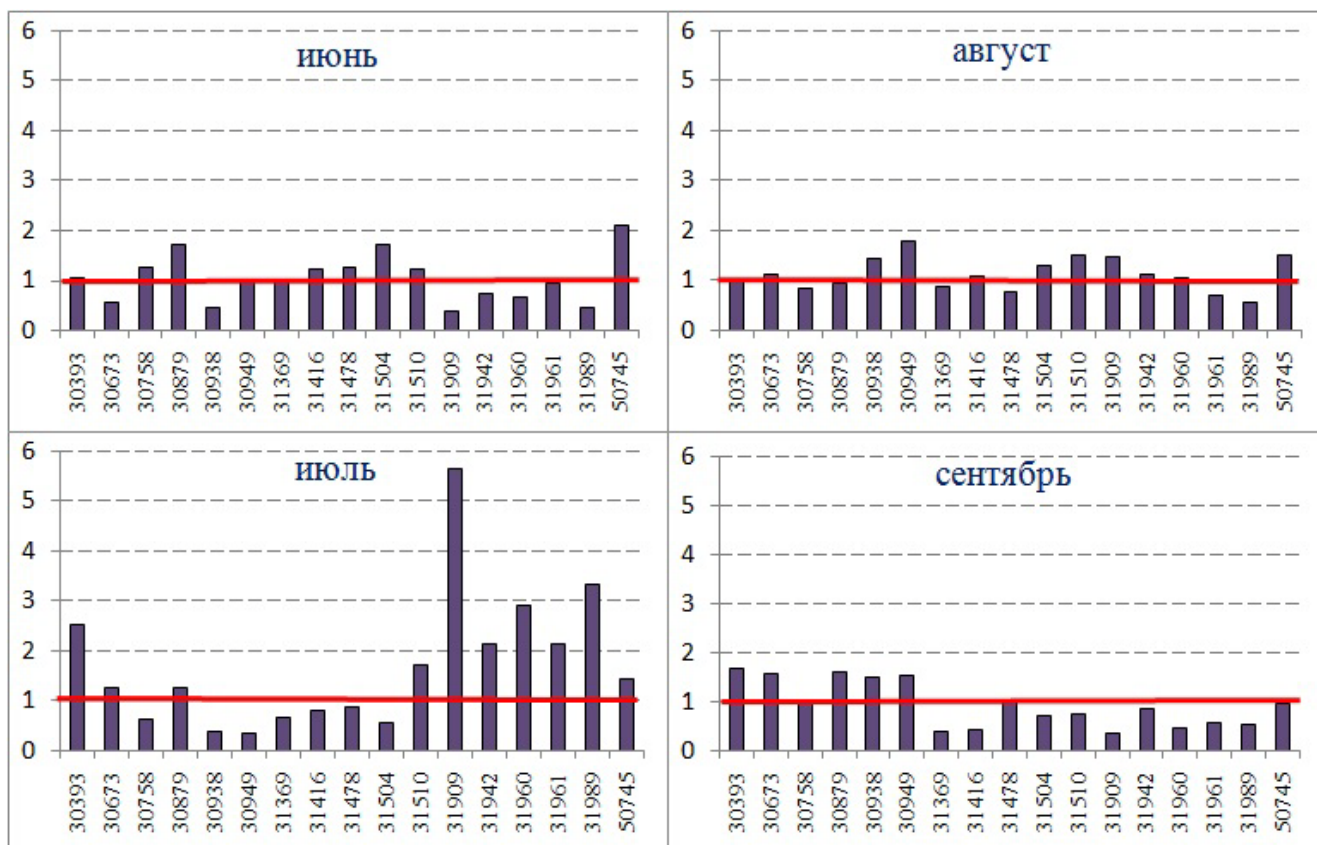


Рисунок 2.4.7 – Превышение (число раз) месячной нормы осадков по метеостанциям в бассейне р. Амур в 2013 г.

На рисунке 2.4.8 представлено распределение осадков в бассейне Амура по месяцам. В июне максимальные осадки наблюдались в бассейне Сунгари, Аргуни и верховьях Буреи; в июле – в бассейне Зеи и особенно Зейского водохранилища; в августе – в нижнем течении Зеи и Буреи и на притоках Уссури; в сентябре также для бассейнов Зеи и Буреи, но при этом наблюдавшаяся величина осадков в несколько раз меньше. В результате наибольшее количество осадков в бассейне р. Амур выпало в июле-августе (Рисунок 2.4.9). За этот период максимальные значения осадков приурочены к Нижне-Зейской равнине (Рисунок 2.4.10).



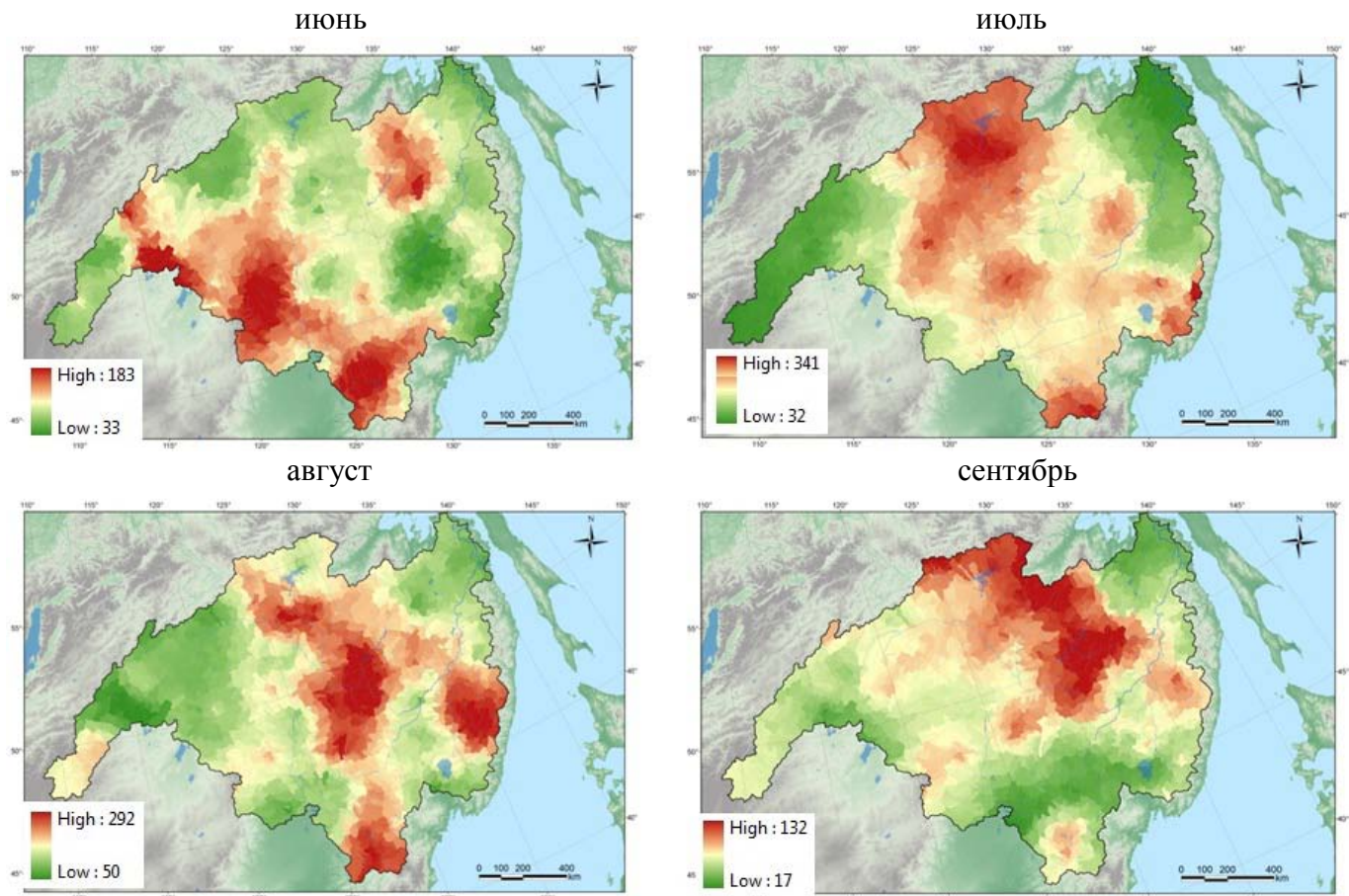


Рисунок 2.4.8 – Распределение месячных сумм измеренных осадков (мм) в бассейне р. Амур в 2013 г. (в легенде показаны верхняя и нижняя границы)

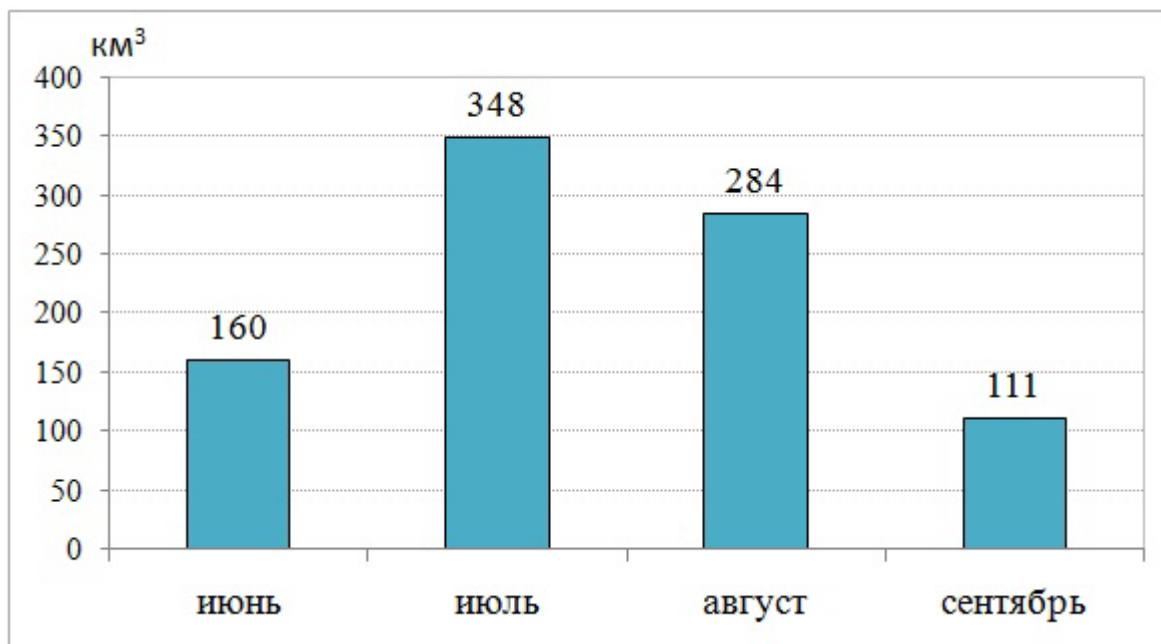


Рисунок 2.4.9 – Объем осадков на водосборе р. Амур, определенный по осадкомерным данным за период июнь-сентябрь 2013 г.



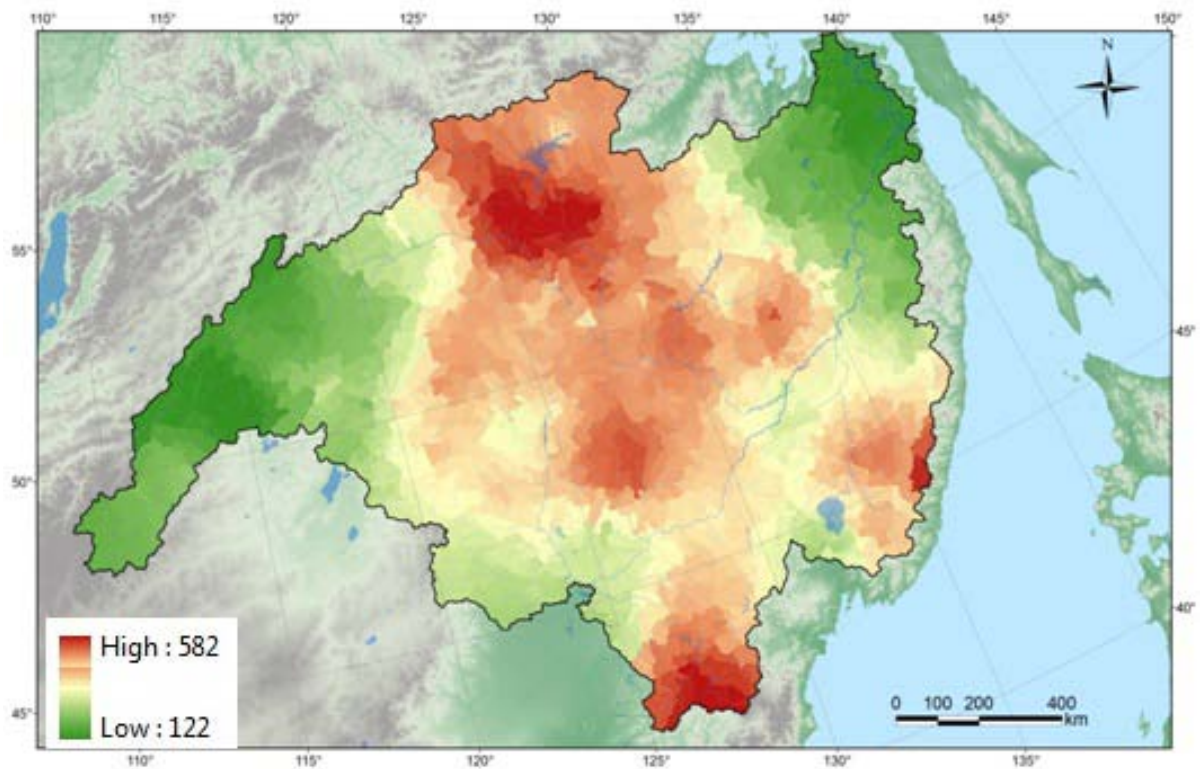


Рисунок 2.4.10 – Пространственная изменчивость суммы измеренных осадков (мм) в бассейне р. Амур за июль-август 2013 г. (в легенде показаны верхняя и нижняя границы)

В результате обильных осадков, выпавших на увлажненную почву, фаза летней межени, которая на Амуре наблюдается в июне – первой половине июля, практически не была выражена, и дождевая вода с минимальными потерями на впитывание в почву стекала в речную сеть, что привело к резкому росту расходов и уровней воды в реках бассейна. Максимумы слоя стока, конечно, соответствуют горным территориям и распределению осадков: июнь – верхнее течение Буреи и Амгуни, июль – бассейн Зеи и притоки Уссури, август – бассейны Зеи и Буреи, притоки Уссури. В сентябре по сути наблюдалось добегание воды по русловой сети (Рисунок 2.4.11).

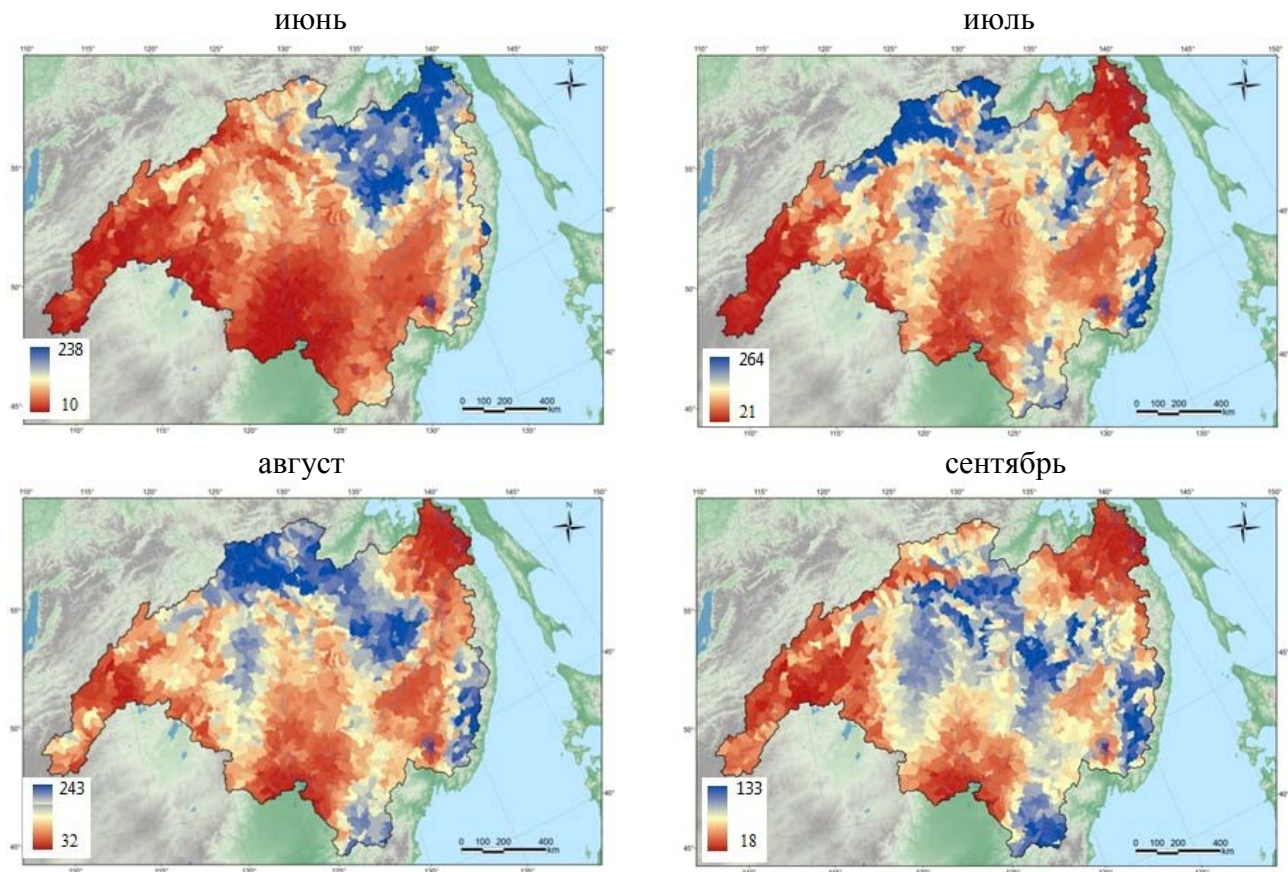


Рисунок 2.4.11 – Пространственное распределение рассчитанного среднемесячного слоя стока (мм) в бассейне р. Амур в 2013 г. (в легенде показаны верхняя и нижняя границы)

Потенциал снижения паводкового стока в бассейне Амура и смягчения последствий наводнения существенно зависят от эффективности регулирования стока Зейским и Бурейским водохранилищами. Возможности подобной оценки с помощью модели формирования стока подробно рассмотрены в следующей главе.

### **Глава 3. Применение модели формирования стока для сценарных оценок противопаводкового эффекта действующих и проектируемых водохранилищ в бассейне р. Амур**

Наводнения – наиболее опасное природное бедствие в России по наносимому ущербу, числу пострадавших и повторяемости. Согласно данным Центра природных катастроф CRED за период с 1990 по 2014 гг. суммарный экономический ущерб от наводнений в России составил порядка 4 млрд. долларов США или 37% от общего ущерба, наносимого всеми бедствиями природного характера, включая землетрясения, пожары, засухи и др. Число пострадавших от наводнений за этот период (2.1 млн. человек) близко к суммарному числу пострадавших от всех остальных природных бедствий.

По данным Росгидромета затоплению подвержены отдельные территории 746 городов, в том числе более 40 крупных, тысячи населенных пунктов с населением около 4.6 млн. человек, хозяйственные объекты, более 7 млн. га сельскохозяйственных угодий. В течение последних нескольких лет ежегодный ущерб от наводнений растет, что обусловлено, в первую очередь, социально-экономическими факторами: заселением территорий, подверженных наводнениям, их более интенсивным промышленным и сельскохозяйственным использованием, увеличением расходов на восстановительные работы в районах бедствий и т.д. Однако в последнее время все более значимое влияние на рост ущерба оказывает увеличение частоты экстраординарных, катастрофических наводнений, которых в последнее десятилетие в мире произошло вдвое больше, чем в 1980-е годы. Рост повторяемости катастрофических наводнений связывают обычно с двумя факторами: изменением климата, сопровождающимся ростом числа экстремально влажных сезонов года, а также увеличением антропогенной нагрузки на речные водосборы и реки. Наблюдаемый рост повторяемости катастрофических наводнений – наиболее опасных из всех природных бедствий в России – дает основания утверждать, что перспективы построения научно обоснованных технологий управления риском наводнений в зависимости от реализации тех или иных возможных сценариев изменений климата и хозяйственной деятельности, а также технологий прогнозирования этих бедствий в реальном времени, становятся важными факторами национальной безопасности.

Возможности повышения эффективности управления риском наводнений (осуществления мер, позволяющих минимизировать наносимый наводнениями социально-экономический и экологический ущерб) связаны, в значительной степени, с развитием комплекса так называемых неструктурных мероприятий. Неструктурные мероприятия направлены на разработку эффективных методов оценки опасности, риска и возможных размеров будущих наводнений с учетом природных и антропогенных изменений, на повышение

заблаговременности и точности прогнозов формирования и развития наводнений в реальном времени. Результаты реализации неструктурных мероприятий создают информационную основу для поддержки решений о выборе, повышении надежности и снижении стоимости комплекса структурных мероприятий (строительства водохранилищ, защитных дамб, изменения морфометрии русел и т.п.), которые направлены на обеспечение необходимого уровня безопасности населения, социальных и производственных объектов.

В отечественной инженерной практике неструктурные средства технологического и информационного обеспечения управления риском наводнений основаны на подходах, разработанных в середине прошлого века и направленных на определение расчетных гидрологических характеристик (расходов или уровней воды) малой обеспеченности по имеющимся рядам наблюдений за речным стоком. Такие подходы дают удовлетворительные результаты лишь для периодов повторяемости, ненамного превышающих длины рядов имеющихся наблюдений за стоком. Кроме того, использование указанных подходов означает принятие гипотезы стационарности рядов наблюдений, т.е. неизменности во времени условий формирования максимального стока. Однако эта гипотеза не всегда выполняется, т.к. физические механизмы формирования наводнений могут существенно отличаться от механизмов формирования обычных паводков и меняться вследствие изменений климата и антропогенной деятельности на водосборе. Наконец, возрастание требований к точности оценки экономического и экологического ущерба от наводнений делает недостаточным определение лишь максимального расхода или уровня воды. Необходимо рассчитывать с помощью современных моделей характеристики водного режима рек (изменения во времени уровней и расходов воды, скоростей течения, продолжительности стояния высоких уровней воды, динамики затопления территорий и т.п.) в период прохождения паводков, что позволит получать обоснованные оценки социально-экономического и экологического ущерба от наводнений естественной и техногенной природы, возможного риска при различных сценариях их развития.

В экономически развитых странах в течение последних 10-15 лет осуществлена модернизация систем оценки риска и предупреждения наводнений на базе современных технологий моделирования и мониторинга. В 2007 г., после катастрофических наводнений начала 2000-х годов, в странах Европейского союза начата реализация программы управления рисками наводнений, в основу которой положены современные модели и технологии оценки опасности и риска наводнений, их прогнозирования, построения карт потенциально затопляемых зон и карт риска в масштабах порядка 1:5000 – 1:25000 для паводкоопасных участков всех без исключения речных бассейнов, расположенных в этих странах. Аналогичная программа, устанавливающая стандарты построения карт риска наводнений в США с

использованием современных технологий гидродинамического моделирования, осуществляется Национальной службой погоды.

Таким образом, в использовании современных научно-технологических достижений для решения задач управления риском наводнений в России наметилось отставание от экономически развитых стран. В то же время модели и технологии, используемые за рубежом для оценки риска наводнений, могут находить лишь ограниченное применение из-за климатических особенностей нашей страны, а также специфики отечественной сети гидрометеорологических наблюдений. Необходима модернизация существующих средств технологического и информационного обеспечения управления риском наводнений на основе современных технологий моделирования наводнений, которые бы в полной мере учитывали климатические условия формирования речного стока на паводкоопасных водосборах России, были адаптированы к стандартным данным гидрометеорологического мониторинга на сети Росгидромета. Инструментальной основой указанных технологий могут стать физико-математические модели гидрологических процессов в речных бассейнах в совокупности с современными средствами информационного и технологического обеспечения этих моделей.

Ниже показаны возможности разработанной нами физико-математической модели формирования стока р. Амур в сочетании с гидродинамическими моделями движения паводковой волны в речной сети и динамики затоплений для решения одной из актуальных задач управления риском наводнений – оценки противопаводкового эффекта действующих и проектируемых водохранилищ при разных сценариях развития паводковой опасности на Среднем Амуре. Приведенные ниже основные результаты опубликованы нами в серии совместных статей [Данилов-Данильян и др., 2014; Данилов-Данильян и др., 2014; Бугаец и др., 2015; Мотовилов и др., 2015; Motovilov et al., 2015].

### **3.1 Оценка противопаводкового эффекта Зейского и Бурейского водохранилищ в период прохождения экстраординарного паводка 2013 г. на основе комплекса физико-математических моделей**

Согласно данным Росводресурсов к началу паводкового сезона 2013 г. Зейское и Бурейское водохранилища были сработаны до предписываемого правилами их регулирования уровня. Во второй половине июля приток воды в Зейское водохранилище вырос почти в 4 раза – с 1600 до 6500 м<sup>3</sup>/с, при этом сбросной расход через гидроагрегаты не превышал 1200 м<sup>3</sup>/с. В конце июля-августе приток воды в водохранилище вырастал до почти 12000 м<sup>3</sup>/с, но сбросные расходы увеличивались при этом лишь до 3500–5000 м<sup>3</sup>/с, т.е. даже на пике паводка Зейское водохранилище аккумулировало бо́льшую часть его объема (Рисунок 3.1.1).





Рисунок 3.1.1 – Фактический сброс и приток воды в Зейское водохранилище в июне-сентябре 2013 г.

На Бурейском водохранилище в течение июня – июля была выполнена дополнительная сработка, что также позволило аккумулировать значительную часть стока, особенно в начале паводкового сезона 2013 г., когда приток воды в водохранилище достигал  $6000 \text{ м}^3/\text{с}$ , а сбросные расходы не превышали при этом  $1000 \text{ м}^3/\text{с}$  (Рисунок 3.1.2). За период прохождения катастрофического паводка с середины июля до конца августа объем аккумулированных вод Зейским водохранилищем составил около  $7 \text{ км}^3$ , а Бурейское водохранилище аккумулировало около  $5 \text{ км}^3$ .



Рисунок 3.1.2 – Фактический сброс и приток воды в Бурейское водохранилище в июне-сентябре 2013 г.

Анализ гидрологических данных в створе Зейской ГЭС показал, что по объему стока паводок 2013 г. стал самым большим за период наблюдений (обеспеченность 0.5%), а по максимальному расходу притока ( $11700 \text{ м}^3/\text{с}$ ) обеспеченность оказалась намного выше (5.7%). Максимальный приток в Бурейское водохранилище в паводок 2013 г. нельзя отнести к



экстремальному: по объему притока обеспеченность оценивается  $\sim 24\%$ , а по максимальному расходу ( $5175 \text{ м}^3/\text{с}$ )  $\sim 50\%$  [Фролов, Георгиевский, 2014].

*Сценарная оценка влияния действующих водохранилищ на водный режим в устьях рек Зеи и Буреи на основе разработанной модели формирования речного стока*

На рисунке 3.1.3 показаны результаты двух численных экспериментов по оценке влияния регулирования стока Зейским и Бурейским гидроузлами (г/у) на снижение максимальных расходов в устьях этих рек в период прохождения паводка 2013 г. В первом эксперименте моделирование гидрографа стока в устьях Зеи и Буреи выполнялось с учетом фактических сбросов из водохранилищ; во втором – в створах Зейского и Бурейского г/у в качестве сбросов задавался рассчитанный гидрограф притока воды к водохранилищам, т.е. был смоделирован гипотетический сценарий отсутствия регулирования стока Зейским и Бурейским водохранилищами.

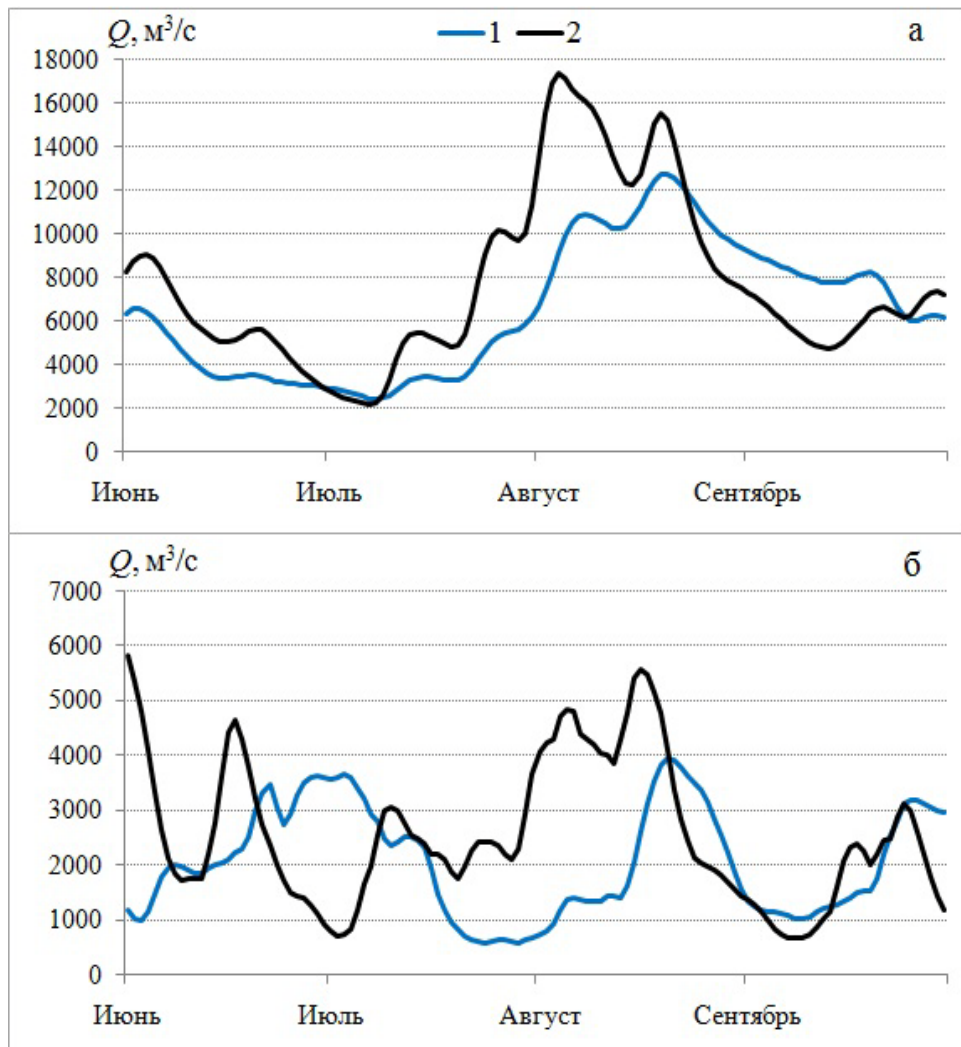


Рисунок 3.1.3 – Рассчитанные гидрографы стока в устьях рек Зеи (а) и Буреи (б) в 2013 г. с учетом (1) и без учета (2) регулирования гидроузлами

Анализ результатов расчетов показал, что гидрограф стока в устье р. Зеи, рассчитанный по сценарию 2, имеет два неравноценных пика. Первый пик  $17300 \text{ м}^3/\text{с}$  4 августа обусловлен обильными осадками, в особенности в западной и южной частях бассейна, и максимальным притоком в Зейское водохранилище на 1 августа  $11700 \text{ м}^3/\text{с}$ , прохождением и распластыванием этой волны паводка по руслу р. Зеи. Ввиду значительной срезки этого пика притока Зейским г/у (на 1 августа разность между притоком и сбросом воды составила  $\sim 10000 \text{ м}^3/\text{с}$ ) на гидрографе стока, рассчитанном по сценарию 1, этот пик не проявляется. Разница расходов воды в устье Зеи, рассчитанных по двум сценариям, на 4 августа составила около  $8300 \text{ м}^3/\text{с}$ . Второй пик расхода 19 августа по сценарию отсутствия Зейского водохранилища составил  $15500 \text{ м}^3/\text{с}$ , а по гидрографу стока, рассчитанному по сценарию 1,  $12600 \text{ м}^3/\text{с}$  (по факту  $13000 \text{ м}^3/\text{с}$ ). На формирование этого пика гидрографа стока оказало влияние как общее увеличение водности рек за счет выпавших осадков, так и повышенные сбросы из Зейского водохранилища. Но главным образом сыграло роль сочетание этих факторов с совпадением по времени прохождения пика волны паводка на р. Селемдже. Разница в максимальных расходах воды по двум сценариям составила в устье р. Зеи на пике паводка около  $2900 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Косвенным подтверждением проведенных расчетов могут служить балансовые оценки наполнения чаши Зейского водохранилища и эффекта регулирования стока Зейской ГЭС в устье Зеи в 2013 г. Согласно фактическим данным ПАО «РусГидро», объем паводка, аккумулированного Зейским водохранилищем (разница между объемами притока воды в водохранилище и сбросов из него в период паводка, когда приток превышал сбросы), составил  $21.9 \text{ км}^3$ . Разница между объемами стока в устье р. Зеи, рассчитанными по сценарию 2 (без учета регулирования Зейской ГЭС) и по сценарию 1 (с учетом регулирования стока водохранилищем), составила  $21.5 \text{ км}^3$ .

Проведенные численные эксперименты для Бурейского водохранилища показали, что регулирование стока Бурейским гидроузлом может почти полностью срезать пики на гидрографе притока и зарегулировать паводковый сток. Например, для 2013 г. наибольшая срезка расходов воды водохранилищем отмечалась в период половодья (до  $8000 \text{ м}^3/\text{с}$ ), а приток воды в период паводка в июле-августе нельзя отнести к выдающемуся, и срезка расходов в устье р. Буреи была около  $3000\text{--}4000 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Нужно отметить, что время фактического наступления основных пиков расходов воды сдвинуто на несколько дней позже по сравнению с модельными величинами, что может быть объяснено увеличением коэффициента шероховатости русла при выходе воды на пойму, которое не учитывается в модели кинематической волны, используемой для описания руслового стекания по притокам Амура. В связи с этим, для оценки влияния водохранилищ на

уровенный режим Среднего Амура была привлечена одномерная гидродинамическая модель, основанная на решении уравнений Сен-Венана.

*Сценарные оценки влияния Зейского и Бурейского водохранилищ на уровеньный режим Среднего Амура с использованием одномерной гидродинамической модели*

Для расчетов неустановившегося движения воды в русле Амура использовалась модель, основанная на решении уравнений Сен-Венана и реализованная в рамках программного комплекса MIKE 11, разработанного в Датском гидравлическом институте [<http://www.mikepoweredbydhi.com/>].

При одномерной схематизации потока система уравнений Сен-Венана включает уравнение неустановившегося движения воды (3.1.1) и уравнение неразрывности (3.1.2):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{(u - u_q)q}{F} = g(i_0 - i_f) \quad (3.1.1)$$

$$\frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(hB)}{\partial t} = q, \quad (3.1.2)$$

где  $x$  – расстояние от начального створа,  $t$  – время,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $u$ ,  $h$ ,  $B$ ,  $F=Bh$  – средняя скорость, средняя глубина и ширина потока, площадь живого сечения соответственно;  $q$  – боковой приток в единицу времени на единицу длины,  $u_q$  – относительная скорость бокового притока,  $i_0$  – уклон водотока, который считается положительным в сторону уменьшения отметок дна;  $i_f$  – уклон трения, задаваемый обычно по формуле  $\frac{U^2}{C^2 h}$ ,  $C$  – коэффициент шероховатости Шези.

В рамках программного комплекса MIKE 11 реализовано численное решение системы уравнений Сен-Венана на основе неявной конечно-разностной схемы. Исходными данными для моделирования является информация о морфометрии речных долин, представленная в виде поперечных профилей. В качестве граничных условий задаются расходы воды на верхней и уровне воды на нижней границе расчетного участка как функции времени, начальные условия задаются в виде уровней водной поверхности в пределах расчетного участка на начало расчета. Для одномерных уравнений Сен-Венана основным калибровочным параметром является коэффициент шероховатости. Результатом моделирования является временной ход расходов и уровней воды в пределах расчетного участка.

Одномерная гидродинамическая модель движения паводковой волны в речном русле на основе уравнений Сен-Венана, построенная для 850-километрового участка Среднего Амура (Рисунок 3.1.4), была реализована с использованием стандартной морфометрической и гидрометрической информации.

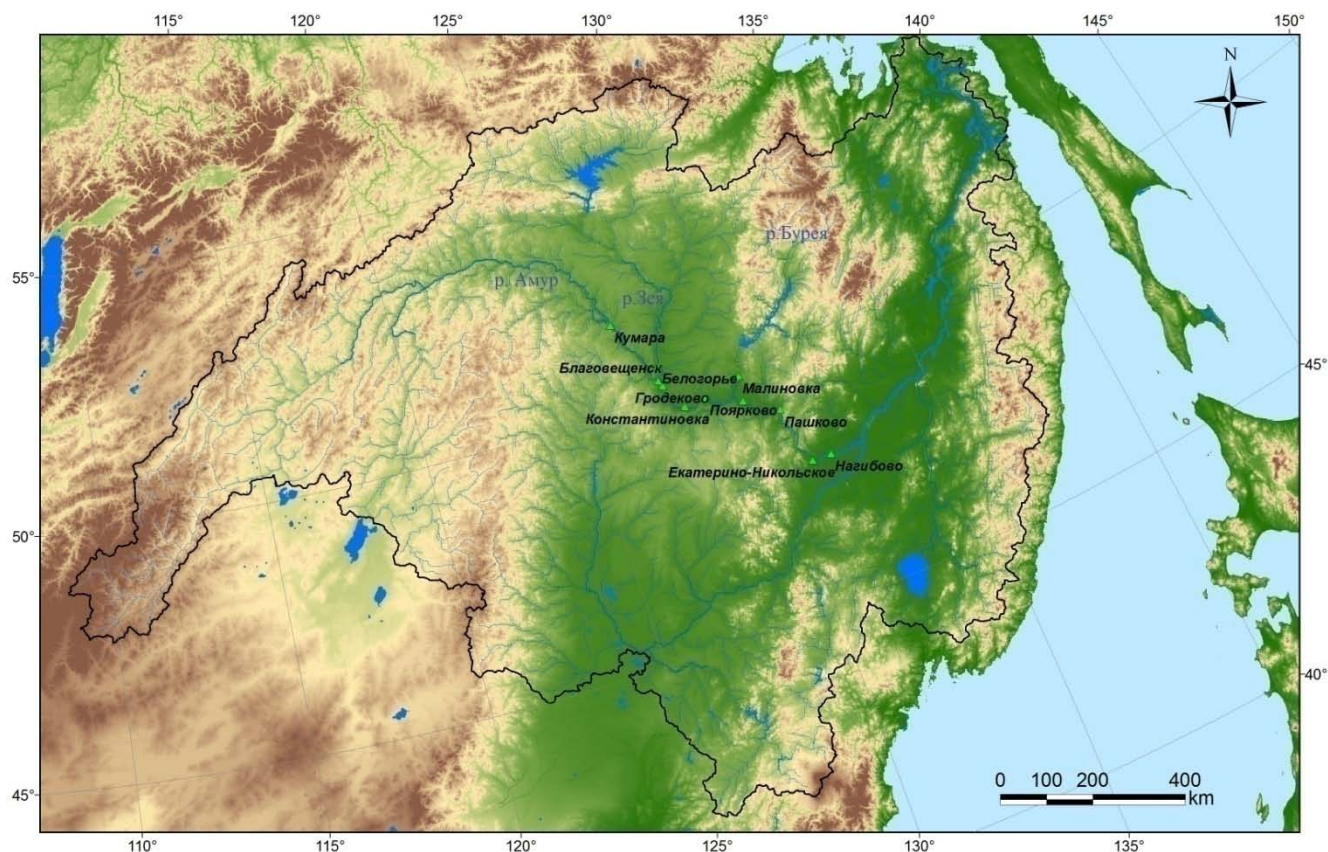


Рисунок 3.1.4 – Расположение гидропостов на участке Среднего Амура, для которого построена одномерная гидродинамическая модель

Морфометрические характеристики русла задавались на основе лоцманских карт, а топография пойменных участков была получена при оцифровке топографических карт масштаба 1:100 000. На исследуемом участке р. Амур было построено 40 поперечных профилей (примерно 1 профиль на 20 км русла). В нашей совместной работе [Калугин, Крыленко, 2014] показано, что такая частота их расположения может позволить получить удовлетворительные результаты расчета уровней воды в крупной реке.

В качестве граничных условий на верхней границе расчетного участка р. Амур г/п Кумара задавались среднесуточные значения расходов воды. При расчете расходов воды за период ледовых явлений по летней кривой расходов применен переходный коэффициент 0.3. На нижней границе задавались уровни воды по г/п Нагибово. В результате гидродинамическая модель описывает русло Амура от г/п Кумара практически до впадения р. Сунгари.

Для определения коэффициента шероховатости Маннинга в русле и на пойме проводилась калибровка этого параметра модели по данным наблюдений за уровнями и расходами воды за период 1975–1999 гг. на следующих гидрологических постах: г. Благовещенск, с. Гродеково, с. Константиновка, с. Поярково, с. Иннокентьевка, с. Пашково и с. Екатерино-Никольское (табл. 3.1). Боковой приток задавался по архивным гидрометрическим данным по г/п Белогорье на р. Зее и по г/п Малиновка на р. Бурее. Оптимальное по критерию

*NSE* соответствие рассчитанных и фактических расходов и уровней воды было получено при дифференцированном коэффициенте шероховатости Маннинга для русловой и пойменной части долины: для русла –  $0.02 \div 0.03 \text{ с/м}^{1/3}$  по длине реки, а для поймы – в 2 раза больше –  $0.04 \div 0.06 \text{ с/м}^{1/3}$ . Верификация модели проводилась за период 2000–2011 гг.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний гидродинамической модели на участке Среднего Амура

Гидрометрический пост	Расстояние от г/п Кумара, км	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	<i>NSE</i> 1975–1999 гг.	<i>NSE</i> 2000–2011 гг.	<i>NSE</i> 2013 г.
с. Кумара	-	478	-	-	-
г. Благовещенск	226	493	0.91	0.88	0.93
с. Гродеково	243	726	0.84/0.75*	0.81/0.72	0.91/0.90
с. Константиновка	335	734	0.74	0.79	0.90
с. Поярково	393	741	0.78	0.83	0.92
с. Иннокентьевка	523	837	0.87	0.79	0.93
с. Пашково	628	856	0.88	0.79	0.82
с. Екатерино-Никольское	797	864	0.77	0.68	0.89

\* в числителе значение *NSE* для расходов воды, в знаменателе для уровней воды

Оценка эффективности расчетов по критерию *NSE* за период калибровки, верификации и отдельно 2013 г. в разных створах показала, что разработанная гидродинамическая модель адекватно отражает динамику хода расходов и уровней воды на исследуемом участке р. Амур со значениями критерия качества моделирования, соответствующими хорошим (табл. 3.1).

При моделировании паводка 2013 г. боковой приток воды по р. Зее и р. Бурее задавался на основе расчетов по модели формирования стока (Рисунок 3.1.3). Результаты сопоставления фактических и рассчитанных гидрографов стока для двух гидропостов, расположенных на р. Амур ниже впадения рек Зеи и Буреи, представлены на рисунке 3.1.5, из которого видно их хорошее соответствие, как по максимальным расходам паводка, так и по времени его прохождения. Лишь в конце расчетного периода на спаде паводка отмечаются расхождения фактического и расчетного гидрографов.



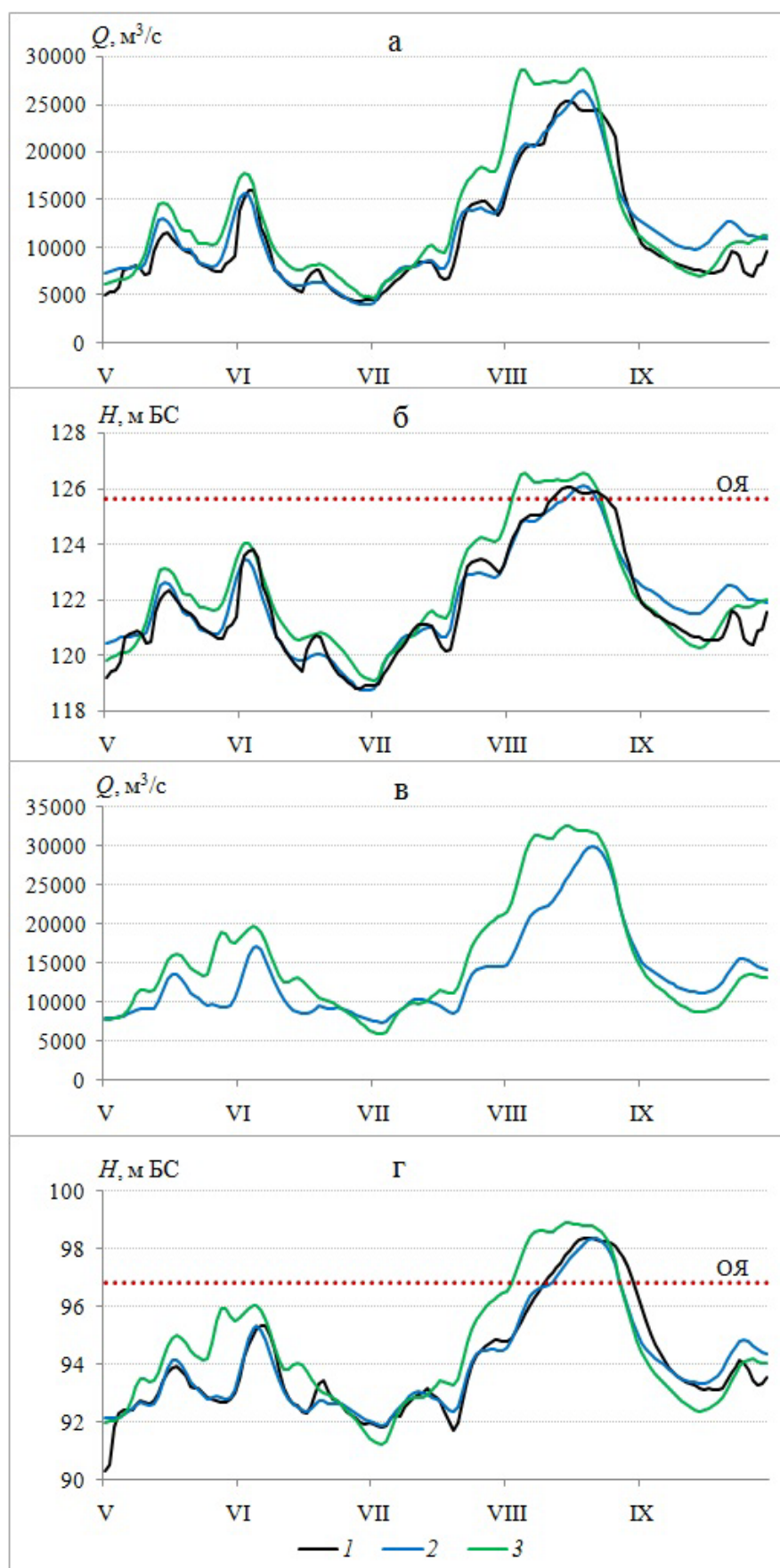


Рисунок 3.1.5 – Фактические (1) и рассчитанные с учетом фактических сбросов из Зейского и Бурейского водохранилищ (2) и при отсутствии регулирования стока водохранилищами (3) расходы и уровни воды р. Амур в 2013 г. Гидропосты: а, б – Гродеково; в, г – Иннокентьевка



Приведенные результаты расчета трансформации волны паводка по гидродинамической модели показали, что отсутствие регулирующей емкости Зейского и Бурейского водохранилищ могло привести к росту уровней воды на подъеме волны паводка (7–9 августа) на г/п Гродеково (пост расположен в 15 км ниже впадения р. Зеи) на 1.75 м, на г/п Иннокентьевка (25 км ниже впадения р. Буреи) на 2.1 м, а в пик паводка на Амуре (20–22 августа) к росту уровней на г/п Гродеково на 0.45 м, а на г/п Иннокентьевка – на 0.4 м. На г/п Гродеково продолжительность стояния уровней выше отметки, соответствующей ОЯ, могла увеличиться с 7 до 20 суток, а на г/п Иннокентьевка – с 16 до 24 суток (Рисунок 3.1.5). Таким образом, регулирование стока водохранилищами позволило не только значительно снизить максимальные уровни на рассматриваемом участке р. Амур, но и существенно сократить время стояния высоких вод.

*Сценарные оценки влияния Зейского водохранилища на динамику затоплений в районе г. Благовещенска с использованием двумерной гидродинамической модели*

Для оценки влияния регулирования стока водохранилищем на снижение опасности затопления населенных участков поймы Среднего Амура необходимо использовать, помимо описанных выше модели формирования стока и движения воды по руслу, более детальную – двумерную гидродинамическую модель, позволяющую воспроизвести динамику затоплений при разных сценариях развития паводка.

Выбор и объединение в действующую систему нескольких моделей, разнородных по структуре, детальности, требованиям к исходной информации – нетривиальная задача, решение которой усложняется постоянным усовершенствованием старых и появлением новых моделей, развитием вычислительной техники, средств передачи информации, технологий измерений, сетевых ресурсов и т.п., появлением новых управленческих задач (например, при планировании гидротехнического строительства). Возможности решения этой проблемы связаны с созданием компьютерных технологий, инвариантных по отношению к особенностям используемых моделей, средств хранения и передачи данных, что позволяет интегрировать эти модели и средства в одну систему и сравнительно легко менять компоненты системы по мере разработки, например, более совершенных моделей, появления новых задач и объектов.

Применение такой технологии – стандарта OpenMI – для разработки интегрированной системы информационной поддержки управления риском наводнений путем объединения современных гидрологических моделей (физико-математической модели формирования стока ECOMAG, одномерной гидродинамической модели MIKE 11 и двумерной гидродинамической модели STREAM-2D [Belikov, Semenov, 1998]) было продемонстрировано в нашей совместной работе [Бугаец и др., 2015] на примере оценки влияния Зейского водохранилища на снижение опасности затопления в районе г. Благовещенска.

В нашей стране впервые возможности применения стандарта OpenMI для создания интегрированных систем гидрологического моделирования были показаны в работе А.Н. Бугайца [Бугаец, 2014]. В ходе преобразования к стандарту OpenMI вычислительные ядра моделей ECOMAG (FORTRAN) и STREAM-2D (C++) были выведены в динамические библиотеки, предоставляющие внешним приложениям функции инициализации, выполнения расчетного шага и завершения. Модели могут работать как в своем обычном режиме, так и в системе OpenMI. Модель MIKE 11 имеет встроенную производителем поддержку OpenMI. Компонент ECOMAG может предоставлять данные о боковом и русловом притоке в любой точке (или на участке) раstra русловой сети. В процессе инициализации на основе данных, полученных из собственной базы данных компонента, создается необходимое количество портов обмена и физическое описание их содержимого. Компонент STREAM-2D на основе собственной пространственной структуры создает порты ввода, в которых ожидает данные о русловом и боковом стоке от ECOMAG и MIKE 11. В процессе расчетов компонент STREAM-2D запрашивает данные на своих верхних входных границах у ECOMAG и MIKE 11. Они выполняют соответствующее количество расчетных шагов до тех пор, пока не достигнут указанного в запросе времени. После этого STREAM-2D запрашивает и получает данные из соответствующих портов вывода компонентов-поставщиков данных, передает их непосредственно на верхние границы и выполняет расчет. После завершения всех расчетов, пользователь может просмотреть результаты работы каждой модели, используя их собственные пользовательские интерфейсы. Компоненты интегрированной системы моделирования в окне конфигуратора GUI OpenMI показаны на рисунке 3.1.6.

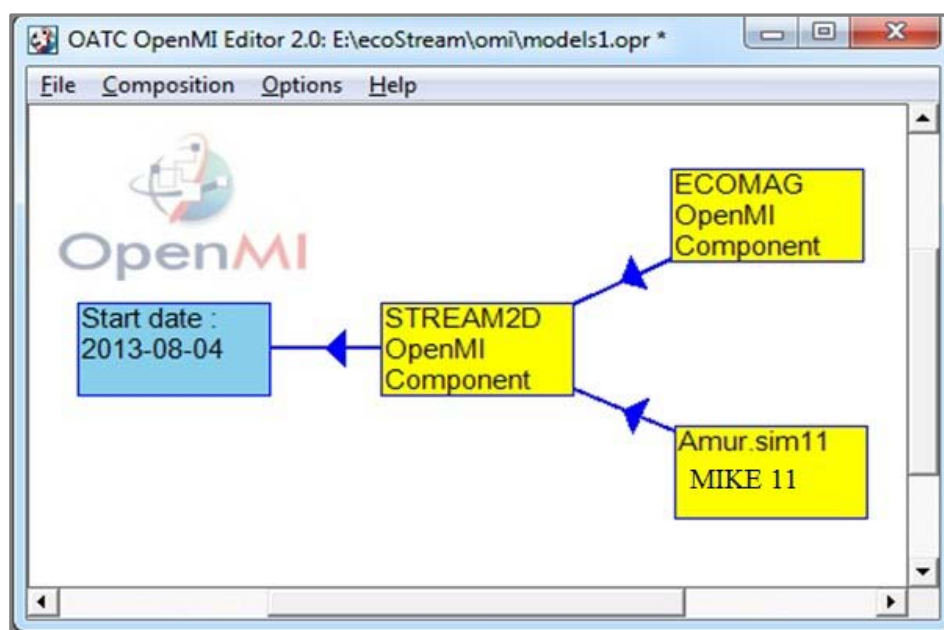


Рисунок 3.1.6 – Компоненты интегрированной системы моделирования  
в окне конфигуратора GUI OpenMI

Для моделирования прохождения паводковой волны 2013 г. был выбран участок долины р. Амур вблизи г. Благовещенска, включая нижнее течение р. Зея (Рисунок 3.1.7).

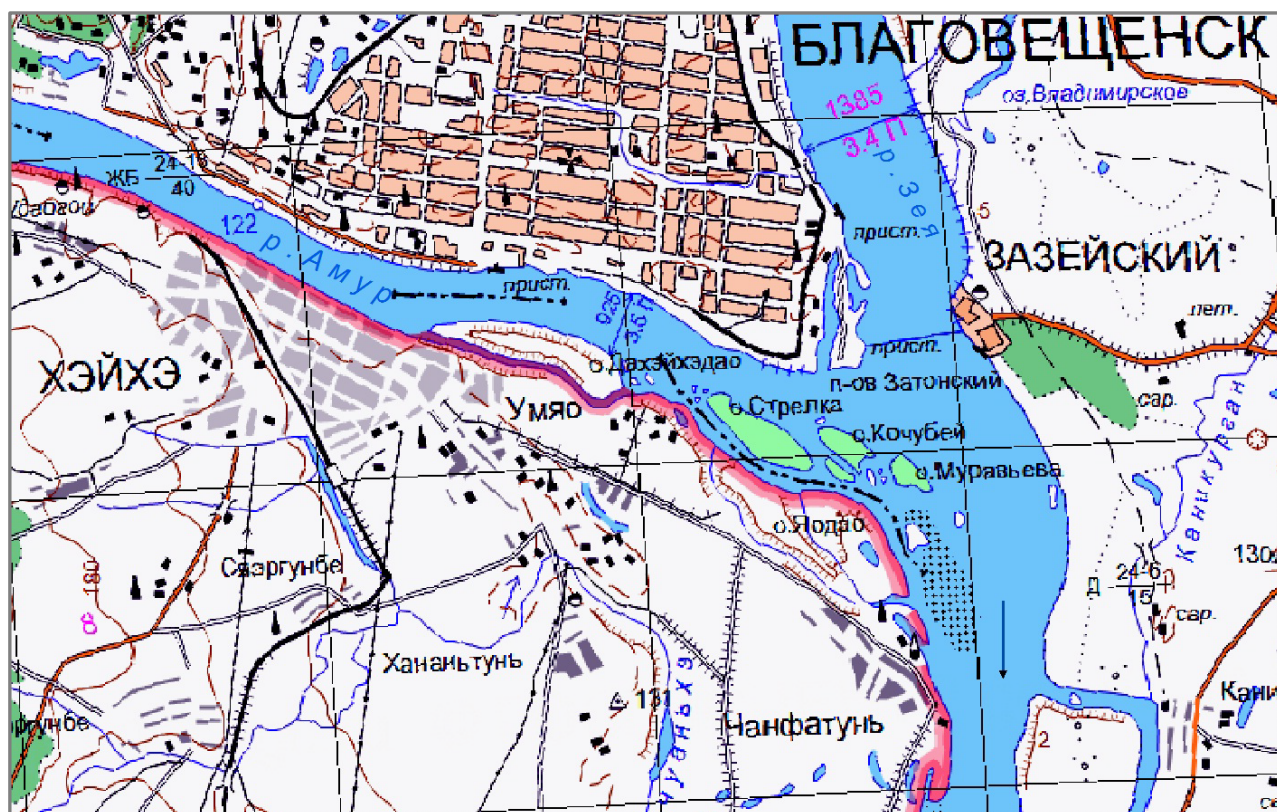


Рисунок 3.1.7 – Карта района моделирования вблизи г. Благовещенска

Описанные выше результаты расчетов стока в бассейне р. Зеи по модели ECOMAG и одномерной гидродинамической модели Среднего Амура MIKE 11 использованы для задания граничных условий в модели STREAM-2D. Эта модель применена для расчетов параметров течения на участке вблизи г. Благовещенска. В основу модели заложена двумерная нестационарная система уравнений мелкой воды, описывающая движение жидкости в горизонтальной плоскости.

В качестве исходных данных для построения рельефа дна использовались результаты инженерно-гидрографической съемки участков русел рек Амур и Зея протяженностью более 23 км, выполненной в июле 2011 г., а также ЦМР, полученная по стереопаре снимков спутника WorldView-1 (США) 22.09.2011 [Беликов и др., 2012]. Расчетная область схематизировалась триангуляционным методом. По всему участку поверхности было получено сгущение по граням треугольников с шагом в 10 м. Массив точек, полученных сгущением по поверхности, использовался при интерполяции рельефа на расчетную сетку модели. Для расчета использовалась треугольная сетка нерегулярной структуры со сгущением в русле рек. Для увеличения производительности количество ячеек в модели было снижено до 10 000 (при стандартном значении для подобных объектов ~50 000). Данное огрубление влияет на



локальные особенности потока, но в целом позволяет адекватно описать картину течений на исследуемом участке.

Для задания верхних границ при расчете течений на участке вблизи г. Благовещенска, модель STREAM-2D с помощью соединений OpenMI управляет работой моделей MIKE 11 и ECOMAG, соответственно, получая от них расчетные гидрографы рек Амура и Зеи.

На нижней границе расчетного участка задавалась зависимость  $Q=f(H)$  для г/п Гродеково. Результаты расчетов затопления на 14.08.2013 г. были совмещены с оцифрованными по космоснимку на эту дату границами затопления местности (Рисунок 3.1.8).

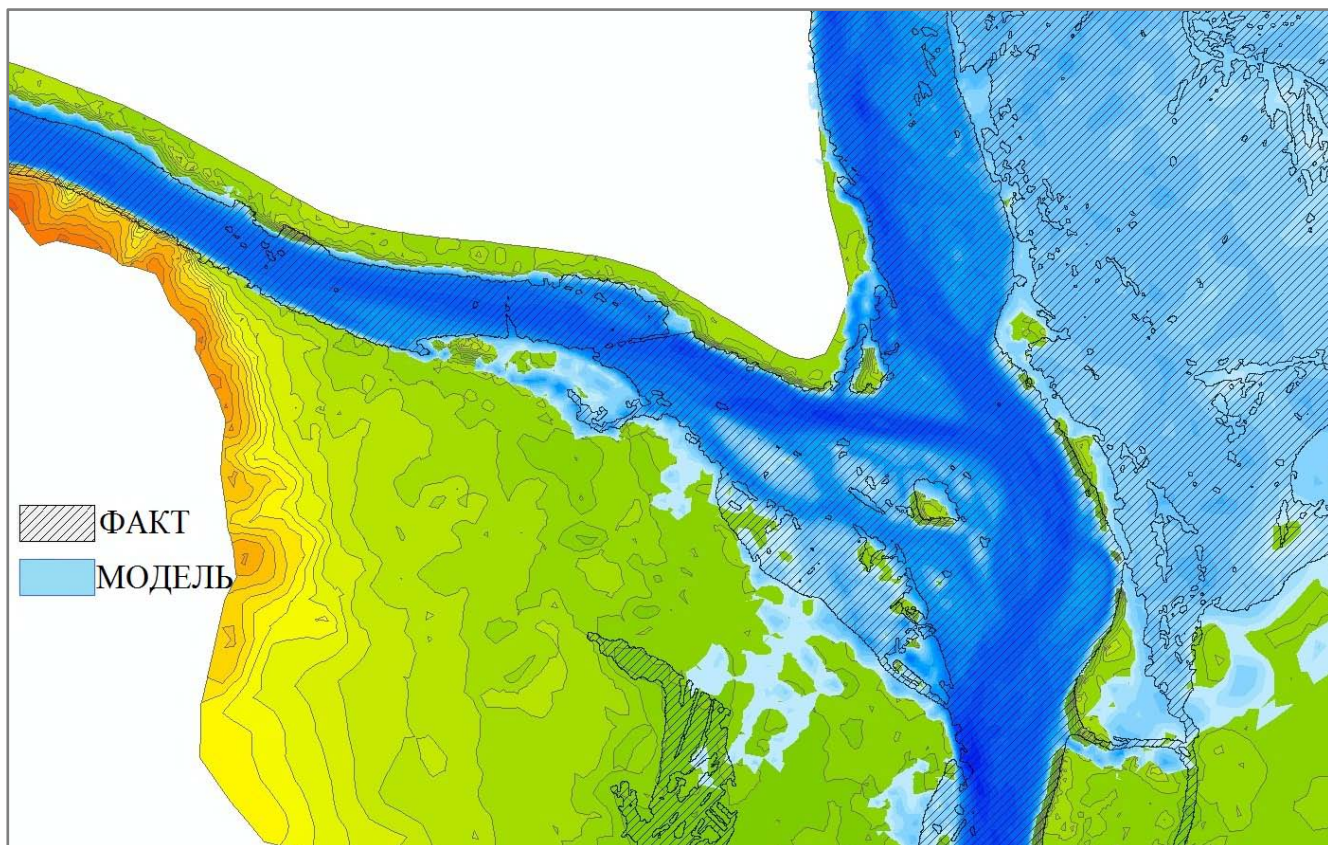


Рисунок 3.1.8 – Фактические и расчетные границы затопления территории вблизи г. Благовещенска на 14.08.2013 г.

Как видно из рисунка, разработанная моделирующая система позволила с удовлетворительной точностью оценить границы затопления у г. Благовещенска на пике экстраординарного паводка 2013 г.

При оценке противопаводковой функции Зейского водохранилища в первом эксперименте моделирование гидрографа стока в устье р. Зеи выполнялось с учетом фактических сбросов из водохранилища; во втором – в створе Зейского г/у в качестве сбросов задавался рассчитанный гидрограф притока воды к водохранилищу, т.е. сценарий отсутствия Зейского водохранилища. Результаты расчетов границ и глубин затопления территории вблизи г. Благовещенска по двум сценариям представлены на рисунке 3.1.9.

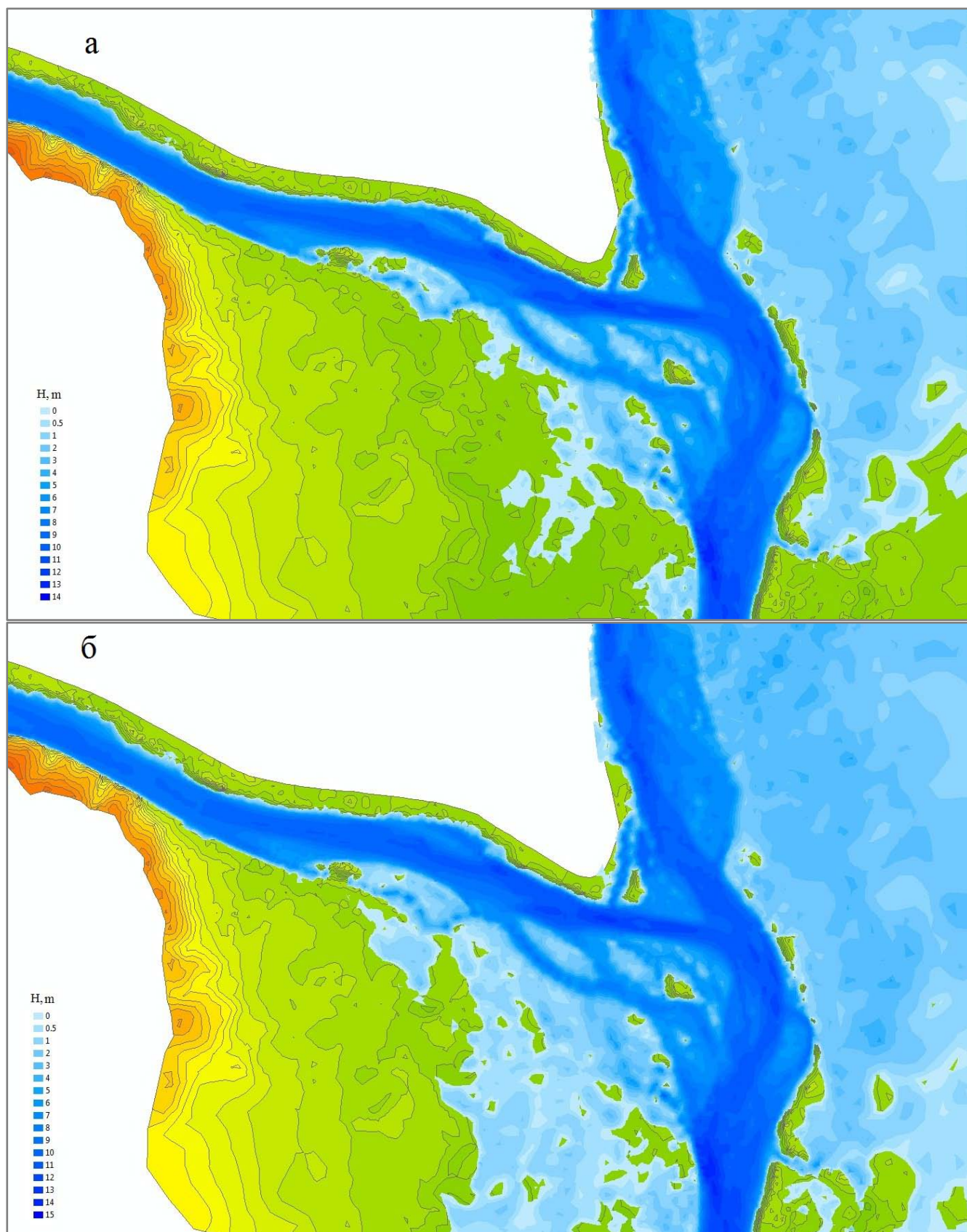


Рисунок 3.1.9 – Рассчитанные с учетом фактических сбросов из Зейского водохранилища (а) и при отсутствии регулирования стока водохранилищем (б) глубины затопления территории вблизи г. Благовещенска на 14.08.2013 г.



Эти эксперименты показали, что регулирование стока Зейским водохранилищем существенно ослабило последствия наводнения на участке Среднего Амура в районе г. Благовещенска. В частности, расчеты трансформации волны паводка по двумерной гидродинамической модели показали, что отсутствие регулирующей емкости Зейского водохранилища могло привести к росту уровней воды на подъеме волны паводка в районе г. Благовещенска на 1.5 м, а в пик паводка на Амуре к росту уровней на 0.45 м.

### **3.2 Оценка противопаводкового эффекта проектируемых Селемджинского, Нижне-Зейского и строящегося Нижне-Бурейского водохранилищ на основе модели формирования стока в бассейнах рек Зеи и Буреи и одномерной гидродинамической модели движения паводковой волны**

Нами был проведен анализ различных вариантов размещения новых гидроузлов и водохранилищ, планируемых для снижения опасности и риска наводнений на паводкоопасных участках речной системы Амура. Для более эффективной защиты территорий от наводнений рассматривается возможность размещения дополнительных резервных противопаводковых емкостей в водохранилищах, которые используются исключительно для аккумуляции дождевых паводков, приходящихся, как правило, на заполненные до НПУ водохранилища. При этом резервная емкость размещается в водохранилищах над отметкой НПУ, а ее величина определяется значением максимального сбросного расхода в створе гидроузла с учетом рельефа местности и существующих ограничений, связанных с незатоплением населенных пунктов. На действующих водохранилищах усиление противопаводковых функций ограничено утвержденными характеристиками гидроузлов.

По результатам анализа выполненных в конце 1970-х годов Ленгидропроектом проектных расчетов [Основные положения..., 1979] в качестве дополнительных резервных противопаводковых емкостей в бассейнах рек Зеи и Буреи были отобраны следующие гидроузлы: Нижне-Зейский г/у на р. Зее, Селемджинский г/у на р. Селемдже, а также строящийся Нижне-Бурейский г/у на р. Бурее (рисунок 3.2.1).



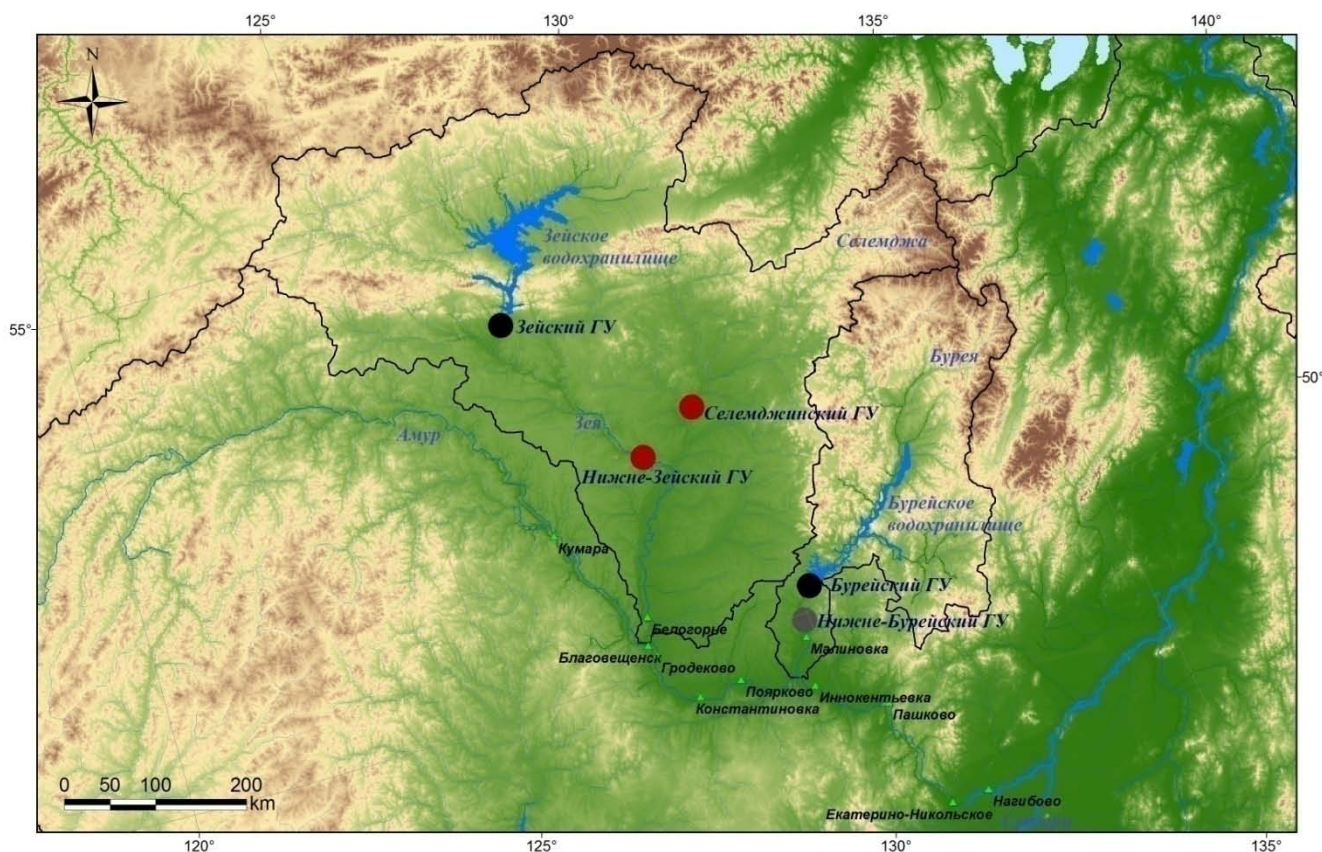


Рисунок 3.2.1 – Расположение действующих, проектируемых и строящегося гидроузлов в бассейнах рек Зеи и Буреи

Нижне-Зейский г/у предполагается построить на р. Зее в 290 км от устья реки выше впадения наиболее крупного ее притока – р. Селемджи. Приток к Нижне-Зейскому г/у на 70% составляет зарегулированный сток из Зейского водохранилища и на 30% – из боковой приточности между створами Зейского и Нижне-Зейского г/у. Полезный объем водохранилища  $\sim 1.5 \text{ км}^3$ . Гидроузел должен выполнять основную функцию контррегулятора, т.е. сглаживать колебания уровней воды, возникающие при изменении режимов работы выше расположенной мощной ГЭС.

Селемджинский г/у предполагается расположить в 124 км выше устья р. Селемджи. Среднегодовой расход в створе ГЭС –  $583 \text{ м}^3/\text{с}$ . При НПУ 225 м полный объем водохранилища составит  $7 \text{ км}^3$  с противопаводковой емкостью  $3.3 \text{ км}^3$ .

Строящийся Нижне-Бурейский г/у располагается в 90 км ниже Бурейской ГЭС, поэтому боковая приточность незначительная, среднегодовой расход лишь на  $20 \text{ м}^3/\text{с}$  больше, чем в створе Бурейской ГЭС, причем часто максимальные расходы на участке между гидроузлами несколько снижаются за счет резкого увеличения ширины реки при выходе воды на пойму. Как и в случае с Нижне-Зейским г/у, Нижне-Бурейский г/у с общей и полезной емкостью 2 и  $0.8 \text{ км}^3$ , выполняет, главным образом, функции контррегулятора.

Гидрологические расчеты по модели формирования стока в бассейнах рек Зеи и Буреи проводились с учетом проектируемых водохранилищ при различных вариантах максимальных сбросных расходов в нижние бьефы гидроузлов как по отдельности для каждого из водохранилищ, так и при совместном их использовании. В результате проведена оценка величины и динамики наполнения и сработки резервных противопаводковых емкостей водохранилищ.

Расчеты по модели формирования стока проводились по фактическим метеорологическим условиям 2013 г. и для паводков с максимальными расходами 1- и 0.1%-ной обеспеченностей. Гидрографы этих паводков были рассчитаны с помощью модели формирования стока при задании на ее «входе» искусственных осадков со средней интенсивностью, обеспечивающей максимальный расход заданной обеспеченности. Пространственное распределение осадков задавалось при этом в соответствии с данными наблюдений 2013 г. Однако этот метод применялся не на этапе калибровки модели, а только для численных экспериментов по оценке противопаводкового эффекта водохранилищ, чтобы расширить диапазон возможной срезки расходов и уровней воды в зависимости от емкости водохранилищ. В частности, паводок 1%-ной обеспеченности получен при множителе на входные фактические осадки 1.15, а паводок 0.1%-ной обеспеченности – при множителе 1.36. При этом рассчитанные максимальные расходы в устье р. Зеи составили соответственно 21100 и 26300 м<sup>3</sup>/с, а в створе Зейской ГЭС соответственно 14900 и 19400 м<sup>3</sup>/с. В [Основные правила..., 1984] максимальные расходы 1- и 0.1%-ной обеспеченностей для створа Зейской ГЭС оцениваются в 14500 и 19800 м<sup>3</sup>/с. Таким образом, предложенный метод оценки максимальных расходов низких обеспеченностей с помощью модели формирования стока по искусственным метеорологическим сценариям дает близкие результаты в сопоставлении с результатами статистической обработки данных гидрометрических наблюдений.

При оценке эффекта планируемых противопаводковых мероприятий в бассейне р. Зеи рассматривались возможности создания резервных противопаводковых емкостей на Нижне-Зейском г/у, обеспечивающих срезку максимальных расходов в нижний бьеф до величин 7000 и 6000 м<sup>3</sup>/с, а на Селемджинском г/у – до 3000 и 2000 м<sup>3</sup>/с. Эти значения максимальных сбросных расходов указаны в проектных документах [Основные положения..., 1979].

Расчеты максимальных резервных противопаводковых емкостей на проектируемых водохранилищах при различных сочетаниях максимальных сбросных расходов в нижние бьефы Нижне-Зейского и Селемджинского г/у для вариантов метеоусловий 2013 г. и паводков 1- и 0.1%-ной обеспеченности приведены в табл. 3.2.1. Нулевое значение в таблице обозначает, что в данном варианте расчета водохранилище не учитывается. Расчеты проводились с учетом

регулирования стока Зейским водохранилищем, т.е. в створе гидроузла задавались фактические сбросы 2013 г.

Таблица 3.2.1 – Оценки максимальных резервных противопаводковых емкостей на Нижне-Зейском (Н-З) и Селемджинском (С) водохранилищах для паводков 2013 г., 1- и 0.1%-ной обеспеченности при различных сочетаниях максимальных сбросных расходов в нижние бьефы гидроузлов

Максимальные сбросные расходы из водохранилищ, тыс. м <sup>3</sup> /с		Максимальная противопаводковая емкость, км <sup>3</sup>					
		паводок 2013 г.		паводок 1%-ной обеспеченности		паводок 0.1%-ной обеспеченности	
Н-З	С	Н-З	С	Н-З	С	Н-З	С
0	0	0	0	0	0	0	0
0	3	0	0.6	0	0.99	0	2.91
0	2	0	1.66	0	3.36	0	7.58
7	0	0.5	0	1.1	0	2.3	0
7	3	0.5	0.6	1.1	0.99	2.3	2.91
7	2	0.5	1.66	1.1	3.36	2.3	7.58
6	0	1.61	0	2.81	0	4.4	0
6	3	1.61	0.6	2.81	0.99	4.4	2.91
6	2	1.61	1.66	2.81	3.36	4.4	7.58

На рисунке 3.2.2 показаны гидрографы стока в устье р. Зеи при различных сочетаниях максимальных сбросных расходов в нижние бьефы Нижне-Зейского и Селемджинского г/у для паводков 1 и 0.1%-ной обеспеченности. На рисунке 3.2.2 черная линия обозначает вариант расчета без учета Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ, серая линия – для сценария отсутствия всех водохранилищ, включая Зейское.

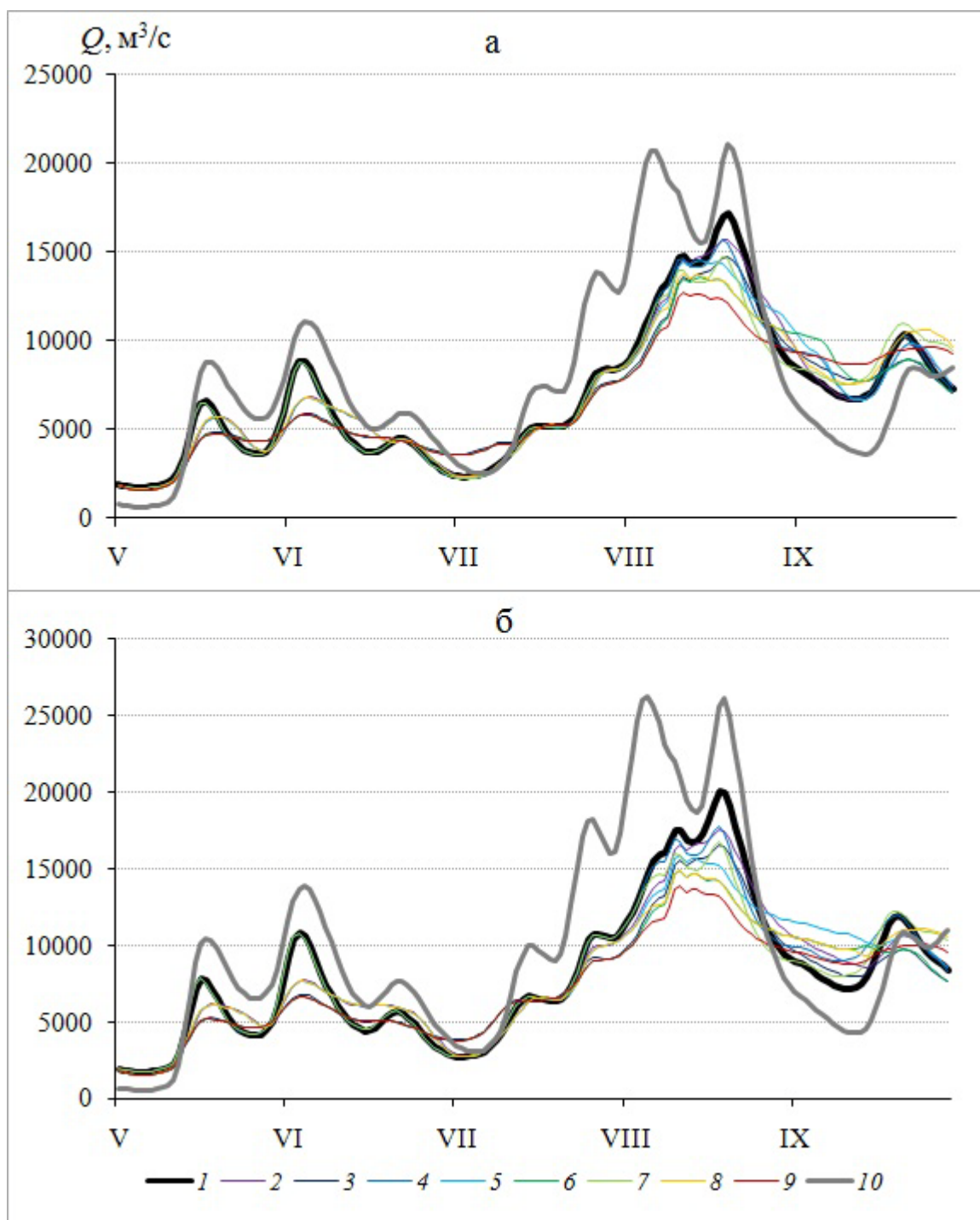


Рисунок 3.2.2 – Рассчитанные гидрографы стока в устье р. Зеи для паводков 1- (а) и 0.1%-ной (б) обеспеченности при различных сочетаниях максимальных сбросных расходов в нижние бьефы Нижне-Зейского и Селемджинского гидроузлов

Регулирование стока только Зейским г/у позволяет снизить максимальные расходы в устье р. Зеи на  $4400 \text{ м}^3/\text{с}$  для паводка 1%-ной обеспеченности и на  $6400 \text{ м}^3/\text{с}$  – для паводка 0.1%-ной обеспеченности. Выше показано, что эффект снижения максимального расхода в устье Зеи на пике паводка для метеоусловий 2013 г. составил  $\sim 2900 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Введение требований на максимальные сбросные расходы в нижний бьеф Нижне-

Зейского г/у порядка 6000–7000 и 2000–3000 м<sup>3</sup>/с для Селемджинского г/у позволяет дополнительно к эффекту Зейского водохранилища снизить максимальные расходы в устье р. Зеи еще на ~ 4000 м<sup>3</sup>/с для паводка 1%-ной обеспеченности и на 6000 м<sup>3</sup>/с – для паводка 0.1%-ной обеспеченности (рисунок 3.2.2). Величины необходимой суммарной резервной противопаводковой емкости двух водохранилищ могут достигать значений 5–6 и 8–12 км<sup>3</sup> для паводков 1- и 0.1%-ной обеспеченностей соответственно. При этом зависимости срезки максимальных расходов в устье р. Зеи от величины суммарной резервной противопаводковой емкости Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ неоднозначны, т.е. при одной и той же суммарной емкости различные сочетания резервных емкостей Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ приводят к разным эффектам снижения максимальных расходов в устье р. Зеи.

В качестве примера на рисунке 3.2.3 показаны рассчитанные гидрографы притока и сбросов воды в створах планируемых гидроузлов, а также динамика наполнения и сработки противопаводковых емкостей Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ для паводка 0.1%-ной обеспеченности при максимальных сбросных расходах в нижние бьефы соответственно 7000 и 3000 м<sup>3</sup>/с.

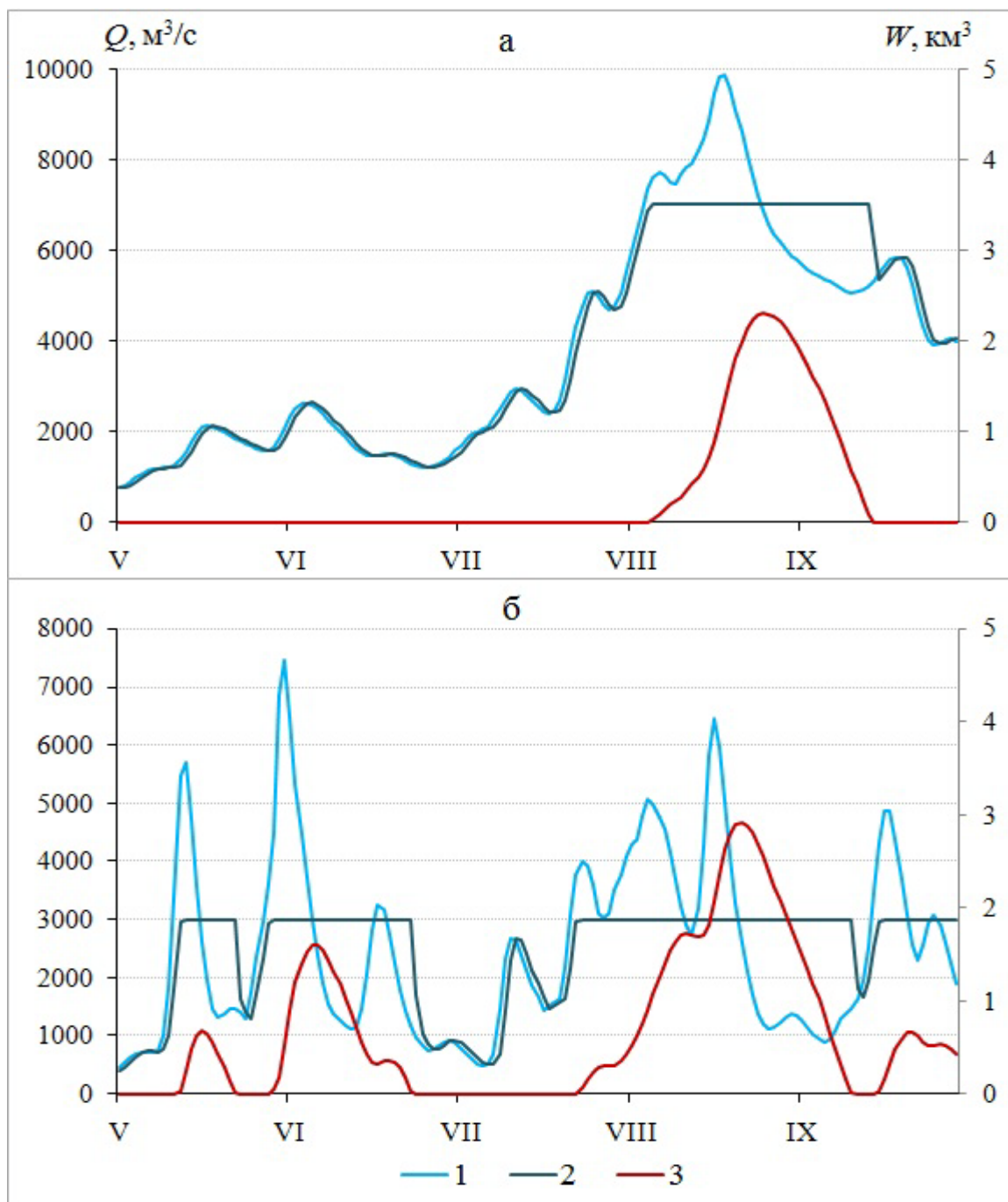


Рисунок 3.2.3 – Гидрографы притока (1) и сбросов (2) воды и динамика наполнения и сработки противопаводковой емкости (3) Нижне-Зейского (а) и Селемджинского (б) водохранилищ для паводка 0.1%-ной обеспеченности

Расчеты показали, что требование снижения максимального сбросного расхода с 3000 до 2000  $\text{м}^3/\text{с}$  для Селемджинского водохранилища приводит к значительному увеличению противопаводковой емкости с 2.9 до 7.6  $\text{км}^3$  для паводка 0.1%-ной обеспеченности, а для Нижне-Зейского водохранилища снижение максимального сбросного расхода с 7000 до 6000  $\text{м}^3/\text{с}$  приводит к увеличению противопаводковой емкости с 2.3 до 4.4  $\text{км}^3$  (табл. 3.2.1). При этом максимальные резервные емкости для паводка 1%-ной обеспеченности в аналогичных условиях в  $\sim 2$  раза меньше, чем для паводка 0.1%-ной обеспеченности. Также время наполнения и



сработки противопаводковых емкостей на водохранилищах значительно увеличивается по сравнению с вариантом паводка 1%-ной обеспеченности.

При моделировании эффекта противопаводковых мероприятий в бассейне р. Буреи, как и для бассейна р. Зеи, рассматривались возможности создания на строящемся Нижне-Бурейском водохранилище резервной противопаводковой емкости, обеспечивающей срезку максимального расхода в нижний бьеф гидроузла в широком диапазоне значений. Расчеты гидрографов стока в устье р. Буреи показали, что при фактических сбросах из Бурейского водохранилища в 2013 г. противопаводковая емкость Нижне-Бурейского водохранилища будет задействована при максимальных сбросных расходах 3000 м<sup>3</sup>/с, при более высоких сбросных расходах резервная емкость водохранилища задействована не будет.

Численные эксперименты по оценке противопаводковой функции проектируемых Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ и их влияния на водный и уровенный режим Среднего Амура ниже впадения р. Зеи проводились при различных вариантах максимальных сбросных расходов в нижние бьефы гидроузлов по одномерной гидродинамической модели Среднего Амура. Результаты этих расчетов для рассматриваемых створов гидростов на Амуре ниже г. Благовещенска для максимальных за период паводка уровней воды приведены в табл. 3.2.2. На рисунке 3.2.4 представлен графический анализ выполненных расчетов для г/п Гродеково.

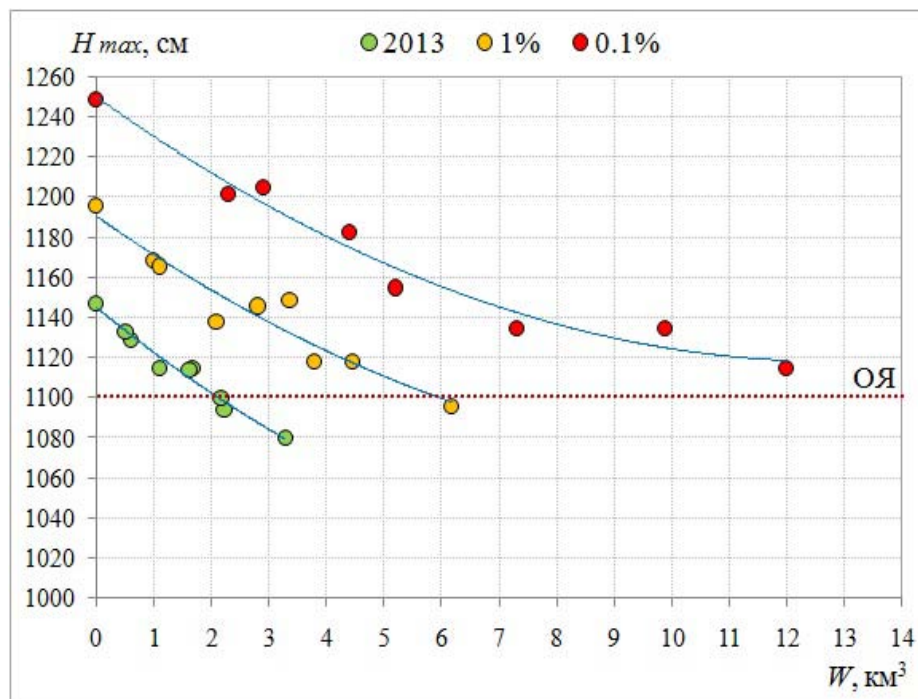


Рисунок 3.2.4 – Зависимость срезки максимального уровня воды на г/п Гродеково от величины суммарной противопаводковой емкости Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ, построенная по результатам численных экспериментов при различных метеорологических сценариях прохождения паводка

Из рисунка 3.2.4 следует, что для каждого из выбранных сценариев метеорологических воздействий на водосбор (сценарий 2013 г., сценарии для паводков 1- и 0.1%-ной обеспеченности) прослеживаются тесные связи между максимальными уровнями в створе гидропоста и величиной суммарной противопаводковой емкости Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ. В частности, расчеты по модели метеоусловий 2013 г. показали, что при отсутствии проектируемых водохранилищ максимальный расчетный уровень в створе гидропоста составляет 1147 см, что на 47 см превышает отметку ОЯ (табл. 3.2.2). Для трех из восьми заданных сочетаний вариантов максимальных сбросных расходов в нижние бьефы гидроузлов и соответствующих суммарных противопаводковых емкостей на проектируемых Нижне-Зейском и Селемджинском водохранилищах максимальные уровни воды в створе гидропоста будут ниже отметки ОЯ, причем для варианта максимальных сбросных расходов 6000 и 2000 м<sup>3</sup>/с для Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ соответственно снижение максимального расчетного уровня относительно варианта отсутствия проектируемых водохранилищ составляет 67 см или на 0.2 м ниже отметки ОЯ.

Расчеты гидрографов стока на Среднем Амуре для варианта паводка 1%-ной обеспеченности на р. Зее показали, что только в одном варианте функционирования проектируемых водохранилищ с теми же максимальными сбросными расходами (6000 и 2000 м<sup>3</sup>/с), что и в предыдущем случае для варианта метеоусловий 2013 г., максимальные уровни в створе г/п Гродеково будут на 4 см ниже отметки ОЯ и на 1 м ниже уровня без учета проектируемых водохранилищ. Необходимая суммарная максимальная резервная противопаводковая емкость проектируемых водохранилищ при этом составляет 6.17 км<sup>3</sup>.

Расчеты по сценарию прохождения в бассейне р. Зеи паводка 0.1%-ной обеспеченности показали, что ни в одном из рассмотренных вариантов функционирования проектируемых водохранилищ на р. Зее уровни воды в створе г/п Гродеково не опускаются ниже отметки ОЯ. Максимальная срезка уровня относительно сценария отсутствия проектируемых водохранилищ составляет 1.3 м для того же наиболее эффективного варианта максимальных сбросных расходов 6000 и 2000 м<sup>3</sup>/с для Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ соответственно. Требуемая суммарная максимальная резервная противопаводковая емкость водохранилищ при этом равна ~ 12 км<sup>3</sup>.

В результате численные эксперименты по оценке противопаводковой функции проектируемых Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ и их влияния на уровенный режим Среднего Амура ниже впадения р. Зеи показали, что введение требований на максимальные сбросные расходы в нижний бьеф Нижне-Зейского и Селемджинского г/у позволяет дополнительно к эффекту Зейского водохранилища снизить максимальные уровни воды р. Амур в створе г/п Гродеково на 0.3–0.7 м для паводка 2013 г., на 0.6–1 и 0.9–1.3 м для

паводков 1- и 0.1%-ной обеспеченностей соответственно. По результатам численных экспериментов получена тесная зависимость ( $R^2=0.90$ ) срезки максимальных уровней р. Амур на г/п Гродеково от величины суммарной противопаводковой емкости Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ (Рисунок 3.2.5).

Физическая обоснованность полученных результатов позволяет считать, что приведенная на рисунке 3.2.5 кривая может быть использована для грубой оценки требуемой суммарной резервной противопаводковой емкости водохранилищ в зависимости от поставленных требований снижения максимальных уровней воды на г/п Гродеково относительно варианта отсутствия проектируемых водохранилищ. Согласно полученной зависимости суммарная емкость двух водохранилищ, например, порядка 6–7 км<sup>3</sup> позволит снизить уровень воды в створе г/п Гродеково ~ на 1 м.

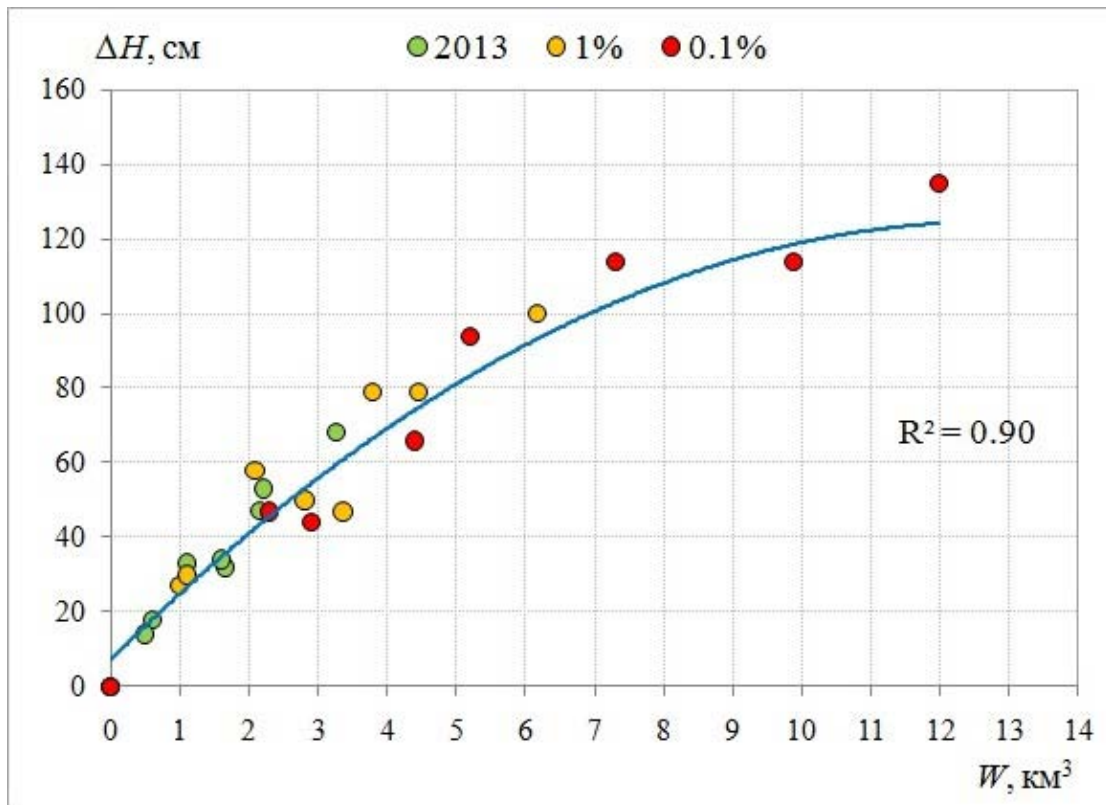


Рисунок 3.2.5 – Зависимость срезки максимального уровня воды на г/п Гродеково от величины суммарной противопаводковой емкости Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ, построенная по результатам численных экспериментов при различных метеорологических сценариях прохождения паводка

Аналогичный анализ результатов численных экспериментов на основании табл. 3.2.2 был проведен для других створов на р. Амур. Влияние проектируемых водохранилищ на реках Зее и Буре прослеживается на сотни километров ниже впадения рек (г/п Екатерино-Никольское), хотя и менее выражено, чем для близлежащих к устьям этих рек створов.

Таблица 3.2.2 – Максимальный уровень воды ( $H$ ) и его срезка ( $\Delta H$ ) на гидропостах Среднего Амура при различных сочетаниях максимальных сбросных расходов ( $Q$ ) в нижние бьефы проектируемых Нижне-Зейского (Н-3) и Селемджинского (С) гидроузлов и необходимых максимальных резервных противопаводковых емкостей ( $W$ ) водохранилищ для паводков 2013 г., а также 1- и 0.1%-ной обеспеченности

Q, тыс. м³/с		W, км³		W общ, км³	Гидропост											
					Гродеково		Константиновка		Поярково		Иннокентьевка		Пашково		Екатерино-Никольское	
Н-3	С	Н-3	С		H, см	ΔH, см	H, см	ΔH, см	H, см	ΔH, см	H, см	ΔH, см	H, см	ΔH, см	H, см	ΔH, см
паводок 2013 г.																
0	0	0	0	0	1147	—	919	—	839	—	1082	—	1797	—	1130	—
0	2	0	1.66	1.66	1114	33	892	27	810	29	1054	28	1762	35	1107	23
0	3	0	0.60	0.60	1129	18	905	14	825	14	1067	15	1779	18	1119	11
6	0	1.61	0	1.61	1113	34	890	29	806	33	1051	31	1757	40	1102	28
6	2	1.61	1.66	3.27	1080	67	862	57	776	63	1022	60	1721	76	1078	52
6	3	1.61	0.60	2.21	1094	53	875	44	791	48	1036	46	1739	58	1090	40
7	0	0.50	0	0.50	1133	14	907	12	824	15	1069	13	1781	16	1118	12
7	2	0.50	1.66	2.16	1100	47	880	39	795	44	1041	41	1745	52	1094	36
7	3	0.50	0.60	1.10	1115	32	893	26	811	28	1055	27	1763	34	1108	22
паводок 1%-ной обеспеченности																
0	0	0	0	0	1196	—	959	—	882	—	1127	—	1859	—	1170	—
0	2	0	3.36	3.36	1149	47	920	39	841	41	1086	41	1806	53	1135	35
0	3	0	0.99	0.99	1169	27	937	22	860	22	1106	21	1834	25	1152	18

6	0	2.81	0	2.81	1146	50	916	43	834	48	1081	46	1799	60	1128	42
6	2	2.81	3.36	6.17	1096	100	876	83	790	92	1038	89	1742	117	1091	79
6	3	2.81	0.99	3.8	1118	78	894	65	810	72	1058	69	1770	89	1110	60
7	0	1.1	0	1.1	1166	30	933	26	853	29	1100	27	1826	33	1146	24
7	2	1.1	3.36	4.46	1117	79	893	66	809	73	1057	70	1769	90	1109	61
7	3	1.1	0.99	2.09	1138	58	911	48	829	53	1078	50	1798	61	1129	41
паводок 0.1%-ной обеспеченности																
0	0	0	0	0	1249	—	1000	—	925	—	1176	—	1928	—	1214	—
0	2	0	7.58	7.58	1185	64	950	50	872	53	1121	55	1854	74	1165	49
0	3	0	2.91	2.91	1205	44	965	35	890	35	1140	36	1880	48	1182	32
6	0	4.4	0	4.4	1183	66	946	54	866	59	1116	61	1847	81	1159	55
6	2	4.4	7.58	11.98	1115	134	890	110	806	119	1055	121	1766	162	1106	108
6	3	4.4	2.91	7.31	1135	114	907	93	825	100	1075	101	1794	134	1124	90
7	0	2.3	0	2.3	1202	47	961	39	883	42	1134	42	1873	55	1176	38
7	2	2.3	7.58	9.88	1134	115	906	94	824	101	1074	102	1793	135	1123	91
7	3	2.3	2.91	5.21	1155	94	924	76	844	81	1095	81	1821	107	1143	71

## Глава 4. Оценка возможных изменений стока р. Амур на основе численных экспериментов с моделью его формирования и глобальными моделями климата

В гидрологии речных бассейнов выделяются две группы подходов к оценке влияния изменений климата на речной сток. В первой группе эмпирических методов, основанных на обработке имеющихся данных гидрометеорологических наблюдений в речном бассейне, распространение получили методы анализа временных рядов характеристик стока (обобщения результатов содержатся в [Lins, 2005; Шикломанов, 2008; Bates et al., 2008]), анализа чувствительности этих характеристик к вариациям климатических параметров с использованием индексов «эластичности» [Sankarasubramanian et al., 2001; Fu et al., 2007; Vano, Lettenmaier, 2014], построения связей пространственных и временных изменений стока («trading space for time») [Peel, Blöschl, 2011; Singh et al., 2011]. Вторая группа объединяет методы, базирующиеся на использовании моделей гидрологического цикла суши, на входе которых задаются искусственные сценарии гидрометеорологических воздействий на речной водосбор. Эти сценарии конструируются либо путем трансформации имеющихся рядов метеорологических наблюдений (например, «delta-change transformation» [Chiew et al., 2009; Motovilov, Gelfan, 2013], «power transformation» [Driessen et al., 2010]), либо на основе расчетов с помощью глобальных (GCM) и региональных (RCM) моделей климата (обзоры даны в [Praskiewicz, Chang, 2009; Chiew, 2009; Peel, Blöschl, 2011; Teutschbein, Seibert, 2011]). Последний подход, объединяющий современные гидрологические модели с моделями климата, позволяет в наибольшей степени учесть разнообразие физических механизмов реакции гидрологической системы на климатические воздействия, однако его развитие сдерживается рядом обстоятельств. В первую очередь, это несоответствие между пространственно-временным разрешением климатических моделей и изменчивостью характерных масштабов гидрологических процессов в речном бассейне (составляющей несколько порядков, как по времени, так и по пространству [Blöschl, Sivapalan, 1995]), а также недостаточная точность воспроизведения метеорологических переменных, особенно осадков, современными моделями [Kundzewicz et al., 2008; Kundzewicz, Stakhiv, 2010; Anagnostopoulos et al., 2010]. Происходящие в последние годы стремительный рост вычислительных ресурсов, развитие измерительных технологий и средств обработки данных наблюдений, а также численных методов способствуют совершенствованию моделей климата, существенному увеличению их производительности и пространственного разрешения, повышению точности расчетов на региональных масштабах [Flato et al., 2013], что обуславливает все более широкое



распространение указанного подхода к оценке влияния изменений климата на речной сток. Вместе с тем, по-прежнему сохраняется значительная неопределенность этих оценок и требуется осторожность в их интерпретации, в особенности, для практического использования в задачах долгосрочного управления водными ресурсами [Wilby, 2010; Kundzewicz, Stakhiv, 2010].

Согласно выводам Второго оценочного доклада Росгидромета, в среднем по территории России рост температуры приземного воздуха за предшествующее столетие в два раза превысил темпы глобального потепления. При этом по сравнению со столетним трендом в последние десятилетия скорость потепления возросла в несколько раз, увеличились годовые суммы осадков, а также частота и мощность наводнений. 2015 год оказался самым теплым за всю историю инструментальных наблюдений в целом по Земному шару, в Северном полушарии и в России.

В настоящее время основным инструментом для сверхдолгосрочного (десятки лет) прогноза изменений климата и стока рек являются расчеты на численных моделях общей циркуляции атмосферы и океана. Климатические модели дают не прогноз, а вероятные проекции климата на десятки лет. Согласно расчетам с помощью современных физико-математических моделей климата в рамках международного проекта CMIP5 в течение XXI века средняя температура приземного воздуха на территории России будет продолжать повышаться [Катцов, Говоркова, 2013]. Наибольшее потепление ожидается в Сибири и в северных регионах России.

Целью исследований, описанных в настоящей главе, является оценка возможных изменений стока р. Амур на основе численных экспериментов с моделью формирования стока и глобальными моделями климата. Глава построена следующим образом. В начале описан метод анализа и даны оценки чувствительности многолетних характеристик стока Амура к изменению климатических параметров на основе разработанной модели формирования стока. Затем показаны возможности расчета многолетних характеристик стока р. Амур за период наблюдений с использованием разработанной модели, на входе которой задаются суточные значения осадков, температуры и влажности воздуха, рассчитанные с помощью ансамбля глобальных моделей климата. В заключительном разделе ансамблевые расчеты глобальных климатических моделей используются для оценки гидрологических последствий изменения климата в бассейне Амура в XXI веке на основе модели формирования стока, и проведен анализ неопределенности этих оценок, обусловленной изменчивостью моделей климата и сценариев радиационного воздействия.

Прежде, чем переходить к рассмотрению полученных результатов, необходимо подчеркнуть, что при проведении описанных ниже численных экспериментов регулирование

стока водохранилищами, расположенными в бассейне Амура, не учитывалось. Во-первых, в описанной выше модели р. Амур отсутствует блок регулирования стока и при проведении описанных выше расчетов задавались фактические сбросы через гидроузлы. Во-вторых, даже при включении в модель такого блока нет оснований полагать, что существующие правила регулирования сохранятся в течение нескольких десятилетий. В-третьих, и это главное, исключив влияние водохранилищ, мы получили возможность исследовать реакцию естественной гидрологической системы бассейна Амура на возможные изменения климата. Как показали численные эксперименты, описанные в предыдущей главе, осредненные за 20 лет (1994-2013 гг.) гидрографы стока р. Амур в замыкающем створе, рассчитанные с учетом и без учета регулирования стока всеми водохранилищами (включая расположенные на территории КНР), отличаются незначительно – примерно на 7% (Рисунок 4.1), что меньше относительной погрешности определения стока р. Амур по данным об уровне воды.

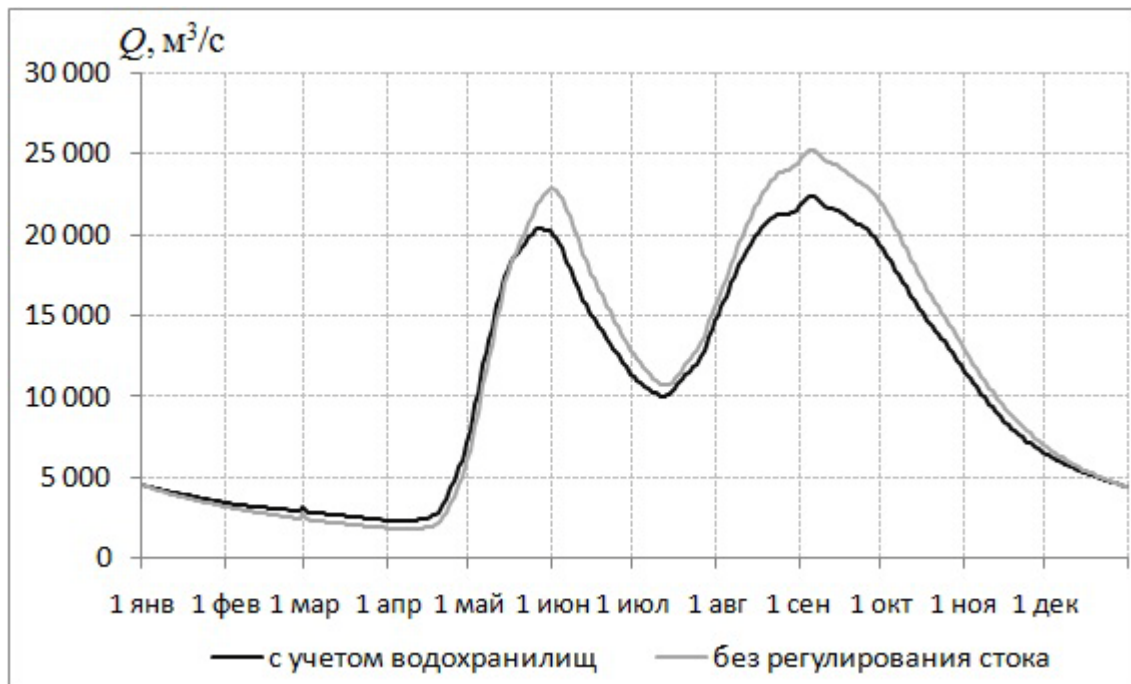


Рисунок 4.1 – Среднегодовой гидрограф р. Амур в створе г. Хабаровск с учетом и без учета регулирования стока водохранилищами

#### 4.1 Оценка чувствительности многолетних характеристик стока р. Амур к изменению климатических параметров

Раздел посвящен исследованию чувствительности стока р. Амур к возможным изменениям климата на основе данных за исторический период. Основные результаты исследований опубликованы ранее в работе [Калугин, 2015]. Для анализа чувствительности использован метод линейной трансформации исходных метеорологических рядов наблюдений (в англоязычной литературе метод «delta-change», DC-метод). Впервые этот метод анализа

чувствительности гидрологических систем с помощью физико-математических моделей гидрологического цикла предложен в работе [Кучмент и др., 1990].

Для проведения численных экспериментов, описанных ниже, мы использовали данные метеорологических наблюдений за период 1994-2012 гг. Данные за 2013 г. были исключены из рассмотрения, т.к. мы не располагали метеорологическими данными за весь год для китайской части бассейна Амура.

Анализ среднегодовых значений температуры и дефицита влажности воздуха, суммы осадков, осредненных для всей территории бассейна р. Амур как средневзвешенное значение по элементарным водосборам, не показал значимых трендов этих величин за указанный период (Рисунки 4.1.1 – 4.1.3).

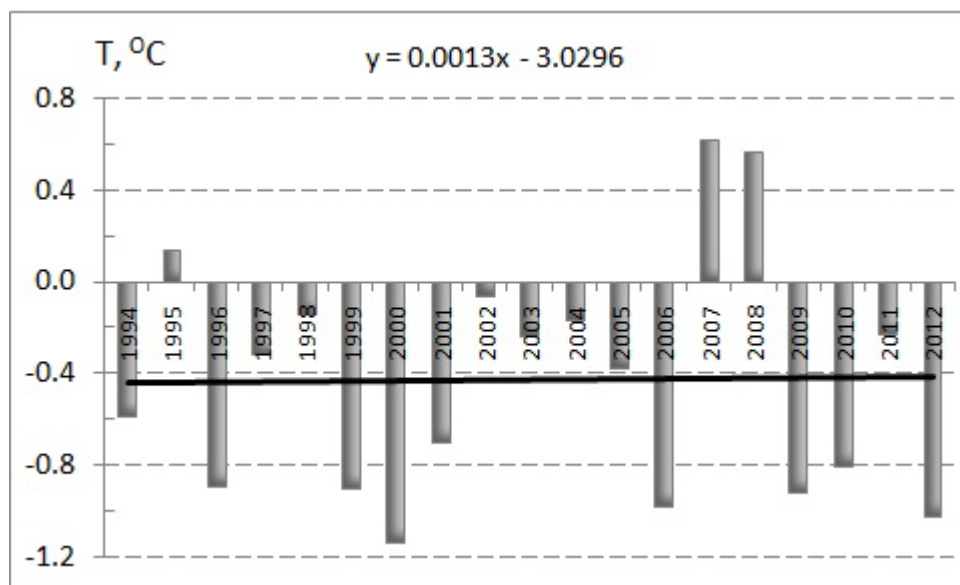


Рисунок 4.1.1 – Среднегодовая температура воздуха в бассейне р. Амур за период 1994-2012 гг.

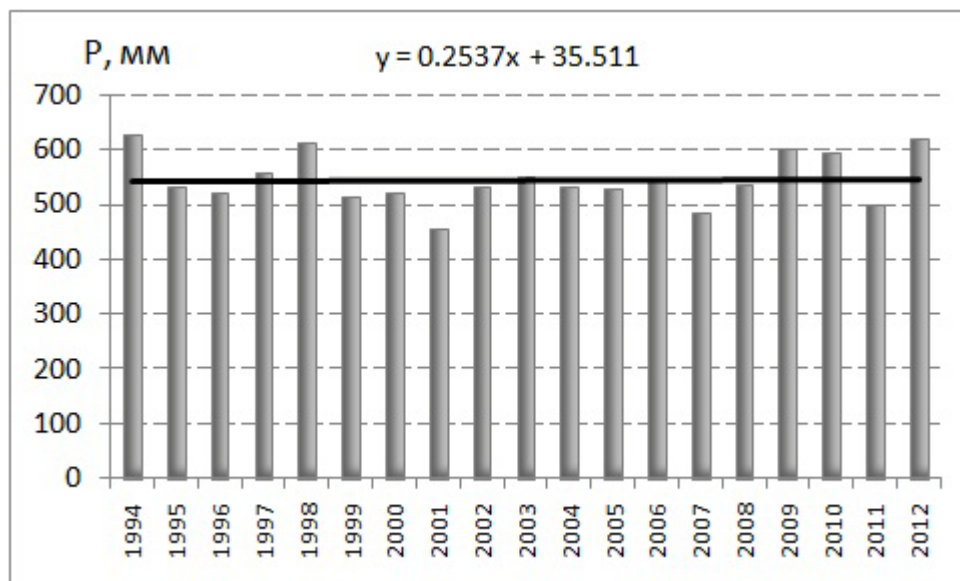


Рисунок 4.1.2 – Годовая сумма осадков в бассейне р. Амур за период 1994-2012 гг.

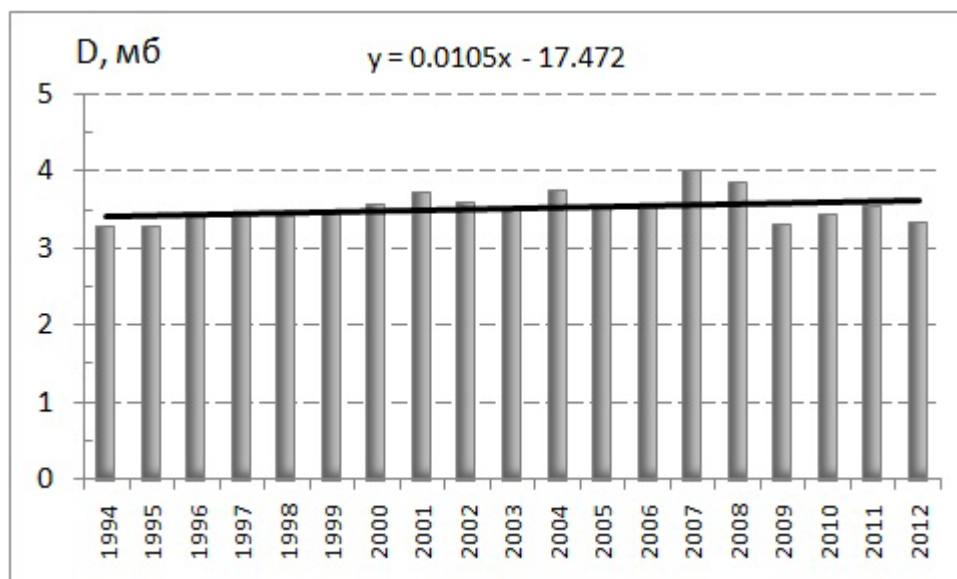


Рисунок 4.1.3 – Среднегодовой дефицит влажности воздуха в бассейне р. Амур за период 1994-2012 гг.

На рисунках 4.1.4 – 4.1.6 представлены внутригодовые распределения указанных выше метеовеличин, осредненные за период 1994-2012 гг. Положительная среднебассейновая температура воздуха наблюдается с апреля по октябрь. Максимум осадков приходится на июль-август, а максимальное значение дефицита влажности воздуха характерно для июня.

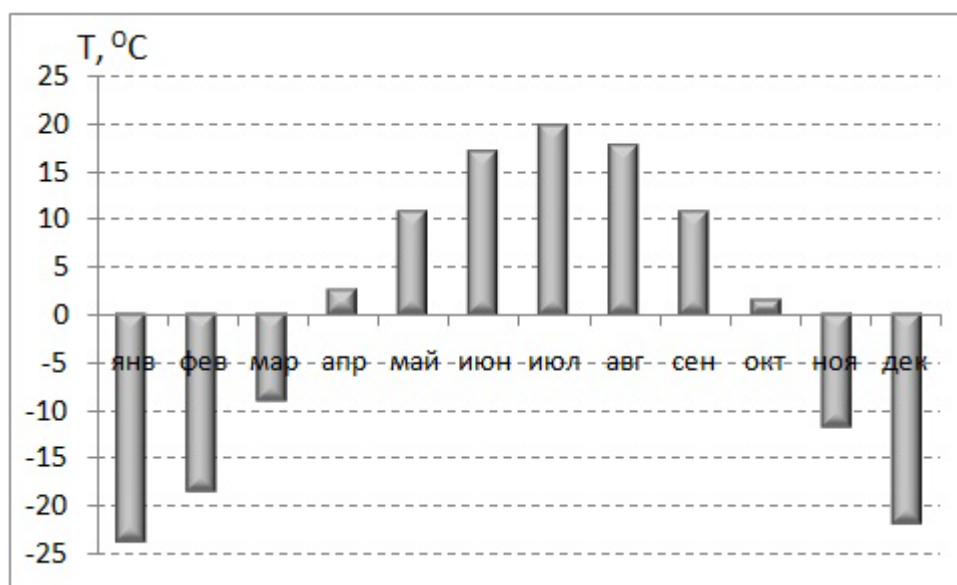


Рисунок 4.1.4 – Внутригодовое распределение температуры воздуха в бассейне р. Амур за период 1994-2012 гг.

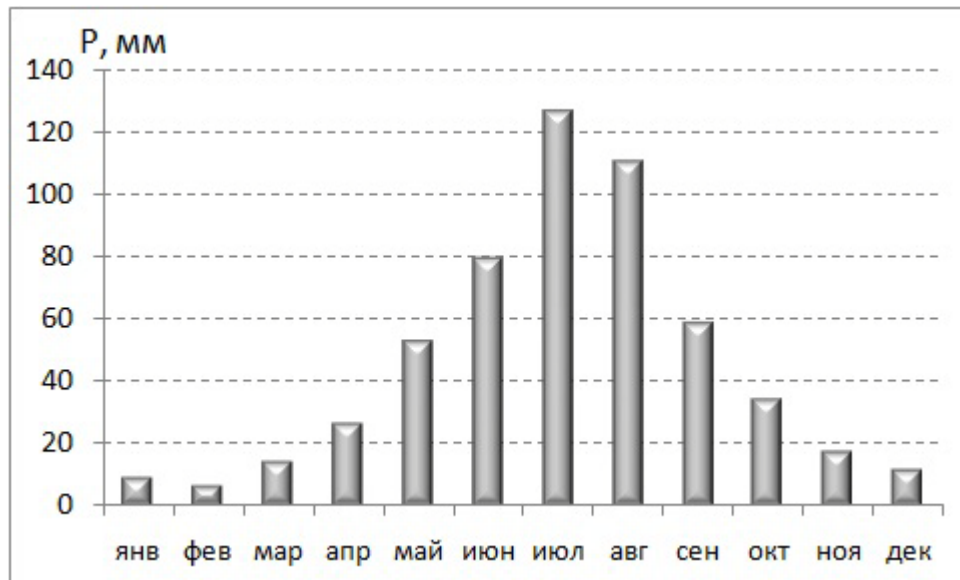


Рисунок 4.1.5 – Внутригодовое распределение сумм осадков в бассейне р. Амур за период 1994-2012 гг.

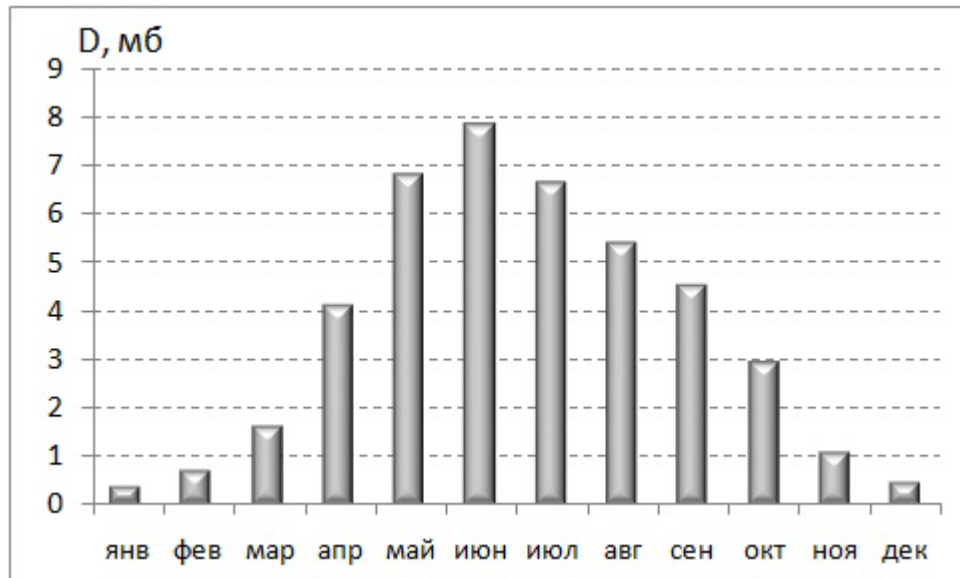


Рисунок 4.1.6 – Внутригодовое распределение дефицита влажности воздуха в бассейне р. Амур за период 1994-2012 гг.

Алгоритм применения DC-метода для анализа чувствительности стока р. Амур к климатическим параметрам заключался в следующем. Ежедневные значения осадков  $P_i$  и температуры воздуха  $T_i$ , измеренные на метеорологических станциях в бассейне Амура за период с 1994 по 2012 гг. ( $i$  – номер суток, начиная с 1 января 1994 г.), изменялись на постоянный множитель  $\Delta P$  и на постоянную величину  $\Delta T$ , °C соответственно. В результате для каждой из 232 метеорологических станций, данные наблюдений которых используются при моделировании стока р. Амур (см. 2 главу), были получены трансформированные ряды ежедневных значений осадков  $P_i^* = P_i \times \Delta P$  и температуры воздуха  $T_i^* = T_i + \Delta T$ . Для

определения трансформированных величин среднесуточного дефицита влажности воздуха  $D_i^*$  (третья входная переменная в модели формирования стока) нами была построена экспоненциальная зависимость наблюдаемых величин дефицита влажности  $D_i$  от температуры воздуха  $T_i$  по данным наблюдений за 1994-2012 гг. (Рисунок 4.1.7). Коэффициент детерминации построенной зависимости оказался довольно высок (0.93).

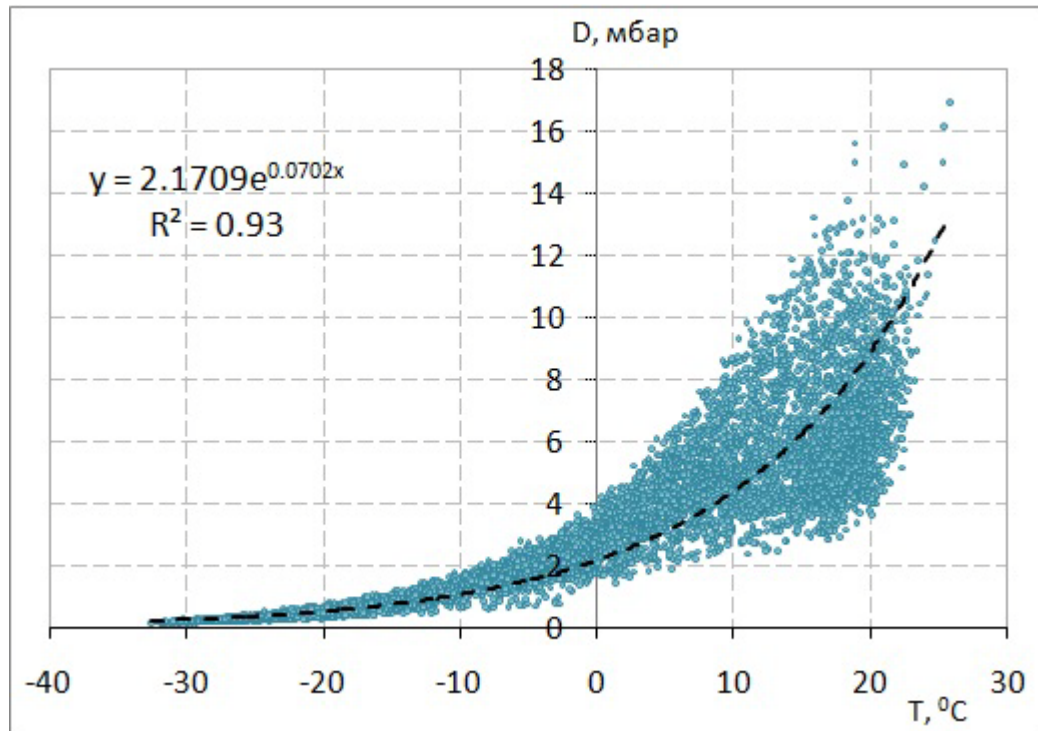


Рисунок 4.1.7 – Зависимость дефицита влажности воздуха от температуры воздуха в бассейне р. Амур

Измененные ряды среднесуточные значения осадков  $P_i^*$  и температуры воздуха  $T_i^*$ , а также рассчитанные по формуле  $D_i^* = 2.17 \exp(0.07T_i^*)$  среднесуточные значения дефицита влажности воздуха задавались на входе гидрологической модели, и рассчитывались характеристики стока, соответствующие разным сочетаниям трансформирующих параметров  $\Delta P$  и  $\Delta T$ . Численные эксперименты проводились при 5-ти значениях  $\Delta P$  (-5%; 0%; +5%; +10%; +20%) и 6-ти значениях  $\Delta T$  (-1°C; -0.5°C; 0°C; +0.5°C; +1°C; +2°C). В результате расчеты проводились для  $5 \times 6 = 30$  различных комбинаций возможных изменений климатических параметров. Результаты расчетов сравнивались со среднегодовым расчетным гидрографом за 1994-2012 гг. при фактических значениях метеоданных (Рисунок 4.1.8). В табл. 4.1 приведены изменения объемов стока р. Амур по отношению к рассчитанному объему среднегодового стока за период 1994-2012 гг. при различных сценариях климатических изменений.



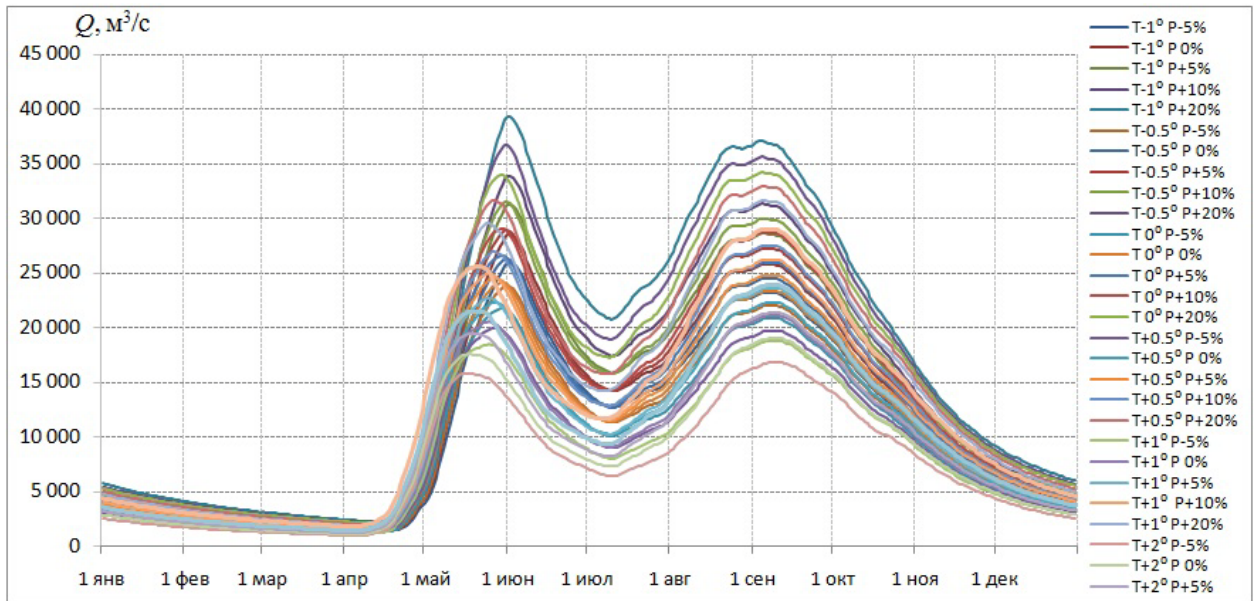


Рисунок 4.1.8 – Чувствительность рассчитанных среднемноголетних гидрографов р. Амур к возможным изменениям климатических параметров

Таблица 4.1 – Рассчитанные изменения (%) среднемноголетнего объема стока р. Амур при различных сочетаниях изменений климатических параметров

$\Delta T, ^\circ\text{C} \backslash \Delta P, \%$	-5	0	5	10	20
-1	0.7	12	23.6	35.5	59.8
-0.5	-5.2	5.7	17.1	28.6	52.7
0	-10.6	0	11	22.4	45.8
0.5	-16	-5.7	5	16	39
1	-21	-11.1	-0.8	9.9	32.2
2	-30.3	-21.2	-11.6	-1.6	19.3

Чувствительность среднегодового стока р. Амур к заданным изменениям климатических параметров оценивалась по полученным данным численных экспериментов следующим образом.

Запишем формально зависимость отклика детерминистической модели от рассматриваемых климатических параметров в виде функции  $f(\ )$ :

$$\bar{Y} = f(\bar{T}, \bar{P}) \quad (4.1.1)$$

где  $\bar{Y}$  – средний годовой сток,  $\bar{T}$  и  $\bar{P}$  – осредненные по площади бассейна среднемноголетние (климатические) значения температуры воздуха и осадков соответственно.

При исследовании чувствительности гидрологических систем используются методы локального и глобального анализа [Saltelli *et al.*, 2004]. Методы локального анализа (в англоязычной литературе – LSA, Local Sensitivity Analysis) позволяют оценить чувствительность функции отклика в окрестности заданных точек пространства параметров, и результаты LSA могут меняться в зависимости от положения этих точек. Для нелинейных функций это может приводить к ошибочным выводам о чувствительности, поэтому в этих случаях используются методы глобального анализа (GSA, Global Sensitivity Analysis). При этом надежность оценок с помощью методов GSA зависит от числа сочетаний расчетных значений функции и ее аргументов, для увеличения которого обычно используют методы статистических испытаний (Монте-Карло, латинского гиперкуба и др.). Для небольших выборок (в нашем случае число таких сочетаний равно 30-ти) локальные оценки чувствительности оказываются более предпочтительными.

Локальные оценки чувствительности модели (4.1.1) к климатическим параметрам задаются градиентами функции в направлении изменения данного параметра или сочетания параметров, а именно:

$$S_T = \left. \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \bar{T}} \right|_{\bar{P}} \quad (4.1.2)$$

$$S_P = \left. \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \bar{P}} \right|_{\bar{T}} \quad (4.1.3)$$

$$S_{T,P} = \frac{\partial^2 \bar{Y}}{\partial \bar{T} \partial \bar{P}} \quad (4.1.4)$$

На рисунке 4.1.9 приведена зависимость расчетных значений среднемноголетнего объема стока  $\bar{r}$ . Амур от изменений климатических параметров, построенная в ПК STATISTICA 8.0 по данным таблицы 4.1 и аппроксимированная линейной функцией:

$$\bar{Y} = 0.75 - 11.8\bar{T} + 2.6\bar{P} \quad (4.1.5)$$

Подобранная методом наименьших квадратов линейная функция (4.1.5) удовлетворительно описывает расчетные данные. На рисунке 4.1.10 показана связь между отклонениями среднего стока, рассчитанными с помощью линейной зависимости (4.1.5) и рассчитанными по модели формирования стока (см. табл. 4.1). Зависимость получилась очень тесной ( $R^2=0.99$ ), а среднеквадратическая погрешность расчета изменений стока по формуле 4.1.5 составила 4.2%.

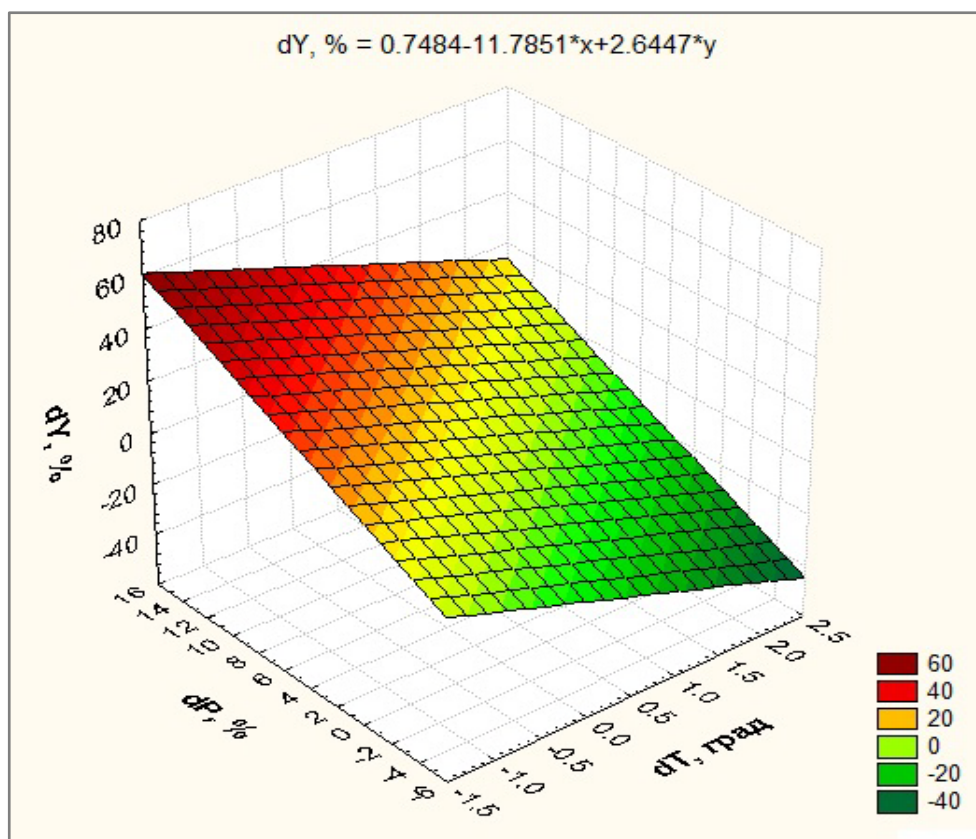


Рисунок 4.1.9 – Зависимость расчетных значений среднемноголетнего объема стока р. Амур от изменений климатических параметров

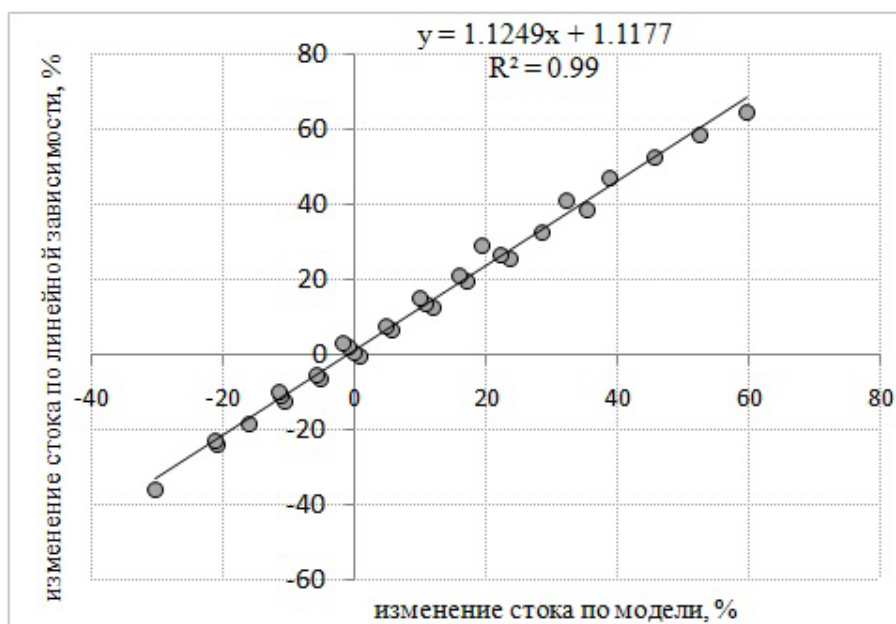


Рисунок 4.1.10 – Связь между отклонениями среднего стока Амура, рассчитанными с помощью линейной зависимости (4.1.5) и рассчитанными по модели формирования стока (табл. 4.1)

Полученные результаты дают основание считать, в первом приближении, линейной зависимость рассчитанных изменений среднемноголетнего стока р. Амур от изменений климатических параметров и использовать формулы локального анализа чувствительности

(4.1.2–4.1.4). Подставляя функцию (4.1.5) в (4.1.2–4.1.4), получим следующие оценки чувствительности:  $S_T = -11.8$ ,  $S_P = 2.6$ ,  $S_{T,P} = 0$ . Таким образом, анализ показал, что при неизменных осадках увеличение средней по бассейну климатической температуры воздуха  $\bar{T}$  на  $1^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению рассчитанного по модели среднемноголетнего стока  $\bar{Y}$  р. Амур почти на 12%. Причина такого уменьшения – рост рассчитанного испарения с поверхности бассейна, сопровождающий рост дефицита влажности воздуха в соответствии с зависимостью, показанной на рисунке 4.1.7. При неизменной температуре воздуха увеличение средней по бассейну климатической суммы осадков  $\bar{P}$  на 10% приводит к увеличению рассчитанного по модели среднемноголетнего стока р. Амур на 26%, т.е. изменения стока более чем в 2.5 раза превосходят изменения осадков. Можно предположить, что большее относительное увеличение стока по сравнению с относительным ростом осадков обусловлено сложением эффекта роста осадков с эффектом снижения потерь поверхностного стока вследствие дополнительного увлажнения бассейна. Ковариационный эффект (эффект взаимодействия) климатических параметров, описываемый оценкой  $S_{T,P}$ , для линейной функции равен нулю. На рисунке 4.1.11 представлены гидрографы при неизменных осадках и их увеличении на 10% и график приращения стока при увеличении суммы осадков.

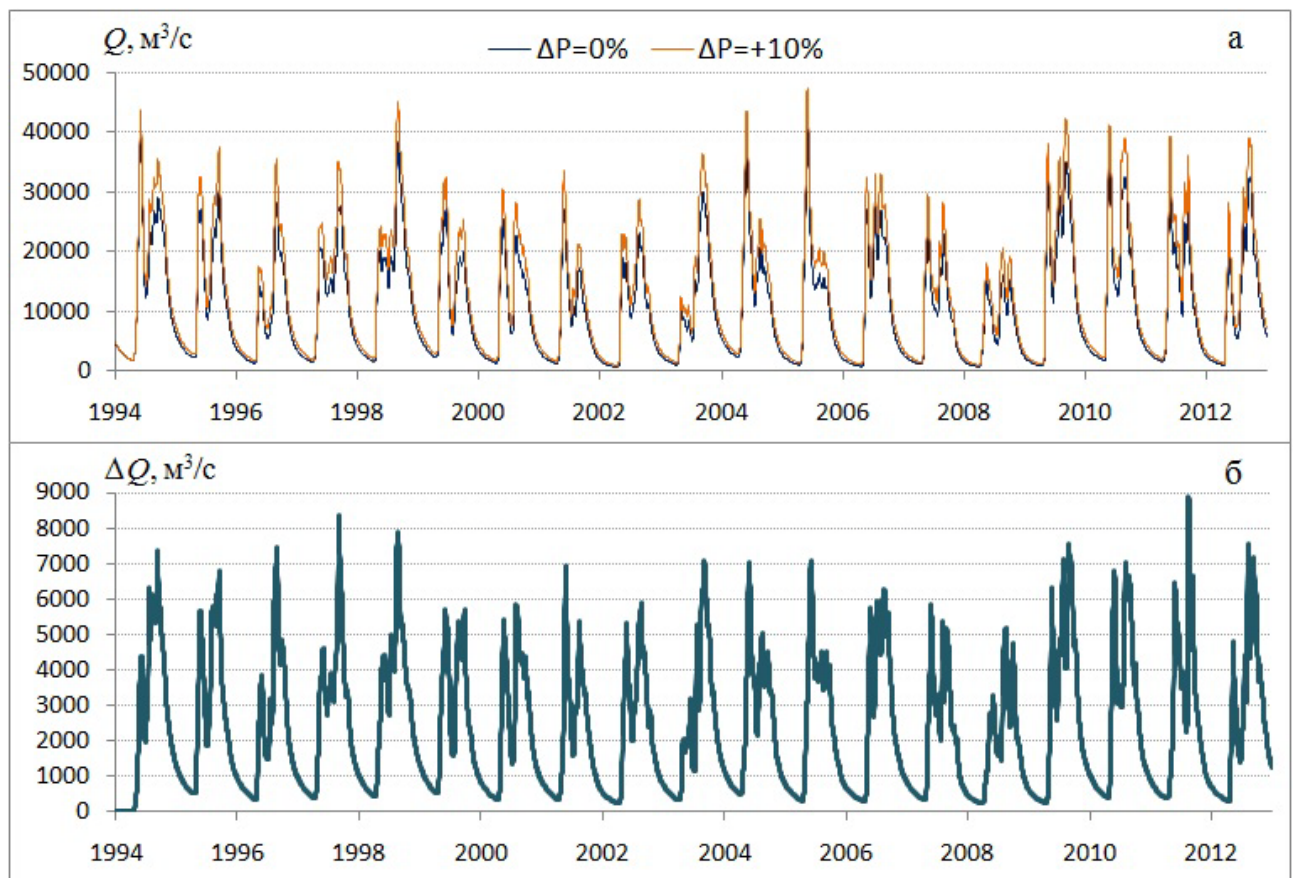


Рисунок 4.1.11 – Гидрографы р. Амур в створе с. Богородское при неизменных осадках и их увеличении на 10% (а) и график приращения стока при увеличении суммы осадков (б)



Ниже рассмотрим изменения внутригодового распределения стока при изменениях климатических параметров. Как видно из рисунка 4.1.12, осредненный гидрограф за период с 1994 по 2012 гг. имеет бимодальную форму с примерно одинаковыми максимальными расходами для половодья и паводков. При этом из-за систематического изменения входных в гидрологическую модель осадков характерного сдвига по дате пика расхода воды не отмечается. При более холодном сценарии климата интенсивность изменения среднегодового объема стока выше, чем при аналогичном изменении осадков в условиях более теплого климата.

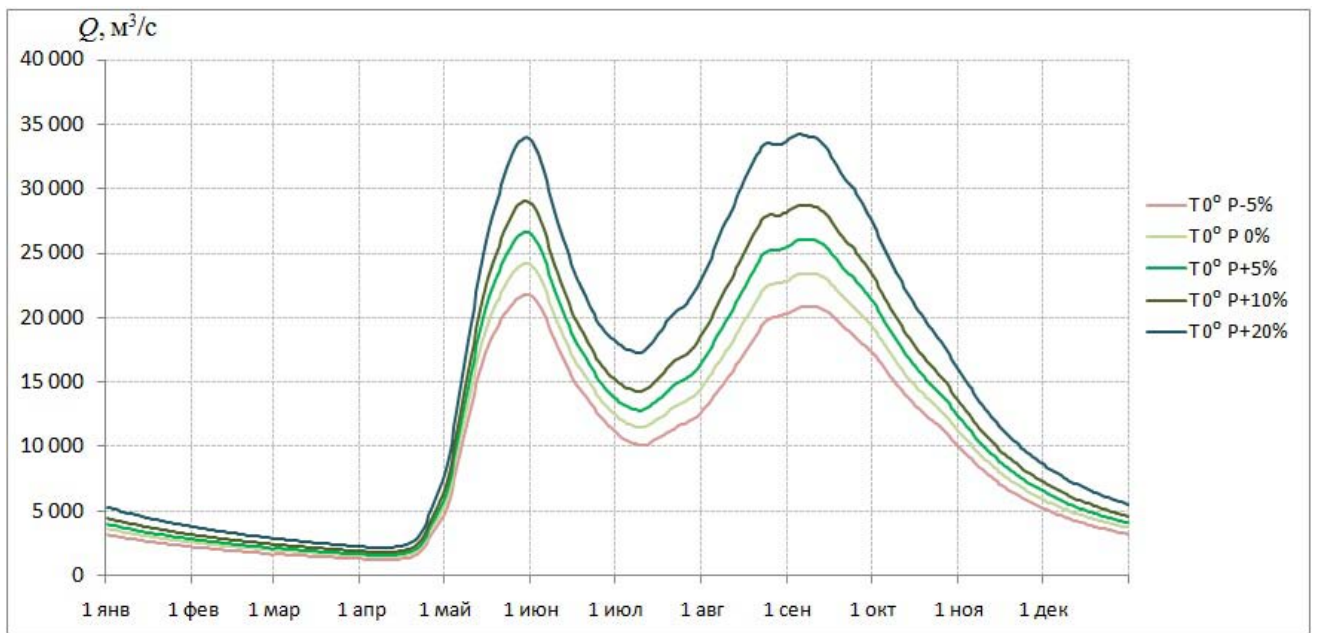


Рисунок 4.1.12 – Среднемноголетние гидрографы р. Амур, рассчитанные при изменении среднегодовых осадков и неизменной средней температуры воздуха

На рисунке 4.1.13 приведены среднемноголетние гидрографы, рассчитанные когда осадки заданы такими же, как и при современном климате, а среднегодовая температура воздуха изменялась в диапазоне от  $-1$  до  $+2$  °C. Анализ графиков показывает, что с увеличением среднегодовой температуры воздуха подъем волны половодья начинается на несколько дней раньше. Например, разница между сценарием понижения температуры воздуха на  $1$  °C и роста на  $2$  °C относительно наблюдавшейся составляет почти неделю. При этом потепление приводит к значительному снижению пиков половодья и паводка. Это связано с тем, что рост температуры одновременно приводит к росту испарения. Нужно отметить, что уменьшение максимального расхода происходит заметнее в половодье по сравнению с периодом летне-осенних паводков. Причем при более интенсивном росте температуры воздуха интенсивность снижения расхода замедляется. Так, если уменьшение максимального расхода между сценариями изменения температуры на  $-1$  °C и  $-0.5$  °C составляет  $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ , то для сценариев  $0.5$  °C и  $1$  °C –  $1400 \text{ м}^3/\text{с}$ . Аналогичный эффект для бассейна Амура, только менее выраженный,

наблюдается в паводковый период: уменьшение максимального расхода между сценариями изменения температуры на  $-1^{\circ}\text{C}$  и  $-0.5^{\circ}\text{C}$  составляет  $1200 \text{ м}^3/\text{с}$ , а для сценариев  $0.5^{\circ}\text{C}$  и  $1^{\circ}\text{C}$  –  $1100 \text{ м}^3/\text{с}$ . При более влажном сценарии климата интенсивность изменения среднегодового объема стока выше, чем при аналогичном изменении температуры воздуха в условиях более засушливого климата. Также рост температуры на каждые  $0.5^{\circ}\text{C}$  вызывает меньшее сокращение годового стока.

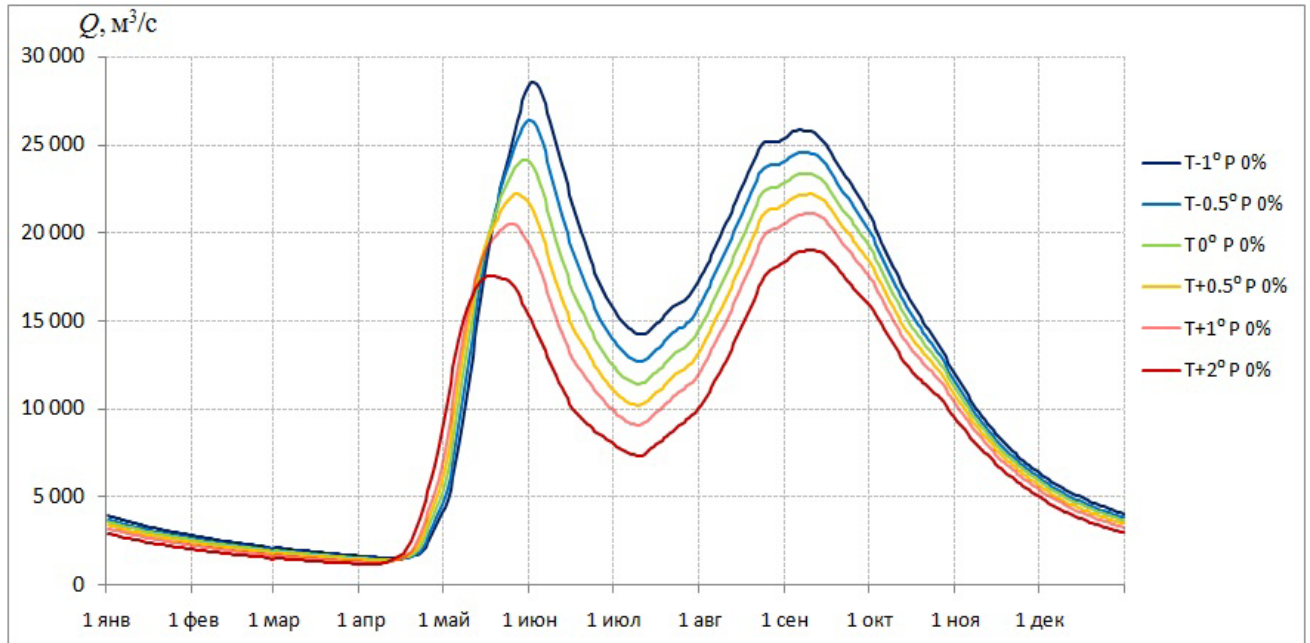


Рисунок 4.1.13 – Среднемноголетние гидрографы р. Амур, рассчитанные при изменении среднегодовой температуры воздуха и неизменных осадках

В следующих разделах главы показаны возможности совместного использования модели формирования стока р. Амур и глобальных климатических моделей для оценки гидрологических последствий изменения климата.

#### 4.2 Моделирование стока р. Амур за исторический период при использовании данных расчетов по глобальным моделям климата

Для оценки гидрологических последствий изменения климата в бассейне р. Амур нами были использованы результаты расчетов по ансамблю глобальных моделей климата (далее используется англоязычная аббревиатура – GCMs, Global Climate Models, General Circulation Models) – участников проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) [Taylor *et al.*, 2012]. Этот проект был инициирован в рамках реализации Всемирной программы по исследованию климата, проводимой Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), и направлен на развитие вычислительных методов описания динамики климатической системы, увеличение производительности климатических моделей, их разрешающей способности, качества воспроизведения глобального и регионального климата



[IPCC, 2013]. Всего в проекте приняло участие более 50 GCMs, которые были разработаны в разных исследовательских центрах мира. Результатом выполнения проекта стали расчеты климата XX века в соответствии с современными (наблюденными) концентрациями парниковых газов и аэрозолей, а также сценарные расчеты климата XXI века при разных сценариях изменений внешних радиационных воздействий (далее RCP-сценариев, Representative Concentration Pathways). В GCMs прогнозируемое для XXI века изменение внешних параметров задается с учетом четырех сценариев антропогенных воздействий, построенных в соответствии с ожидаемым к 2100 году потоком радиации на границе атмосферы RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 (соответственно 2.6, 4.5, 6.0 и 8.5 Вт/м<sup>2</sup>).

Принято считать, что глобальные климатические модели независимы, т.е. каждая из них дополняет информацию о климатической системе Земли. Однако в статье [Masson, Knutti, 2011] отмечается, что фактически количество независимых моделей меньше, чем их общее число в ансамбле CMIP5. Например, часто оказываются схожими различные версии атмосферных моделей, созданные в одной научной организации. Поэтому критериями выбора моделей в наших исследованиях было различие между ними по пространственному разрешению, структуре сеток, набору учитываемых физических процессов. Также важным условием выбора моделей было наличие расчетных данных суточного разрешения по каждому из четырех RCP-сценариев, так как одной из целей настоящей работы было выявление различий стока Амура при разных сценариях увеличения концентрации парниковых газов. С учетом принятых условий для проведения численных экспериментов из ансамбля CMIP5 нами были отобраны данные девяти GCMs: BCC-CSM1.1, CCSM4, CSIRO-Mk3.6.0, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, MRI-CGCM3, NorESM1-M. В таблице 4.2.1 дана краткая характеристика отобранных моделей.

Таблица 4.2.1 – Краткая характеристика глобальных климатических моделей, данные которых используются в настоящей работе

№ п/п	Научные организации- разработчики, страна	Индекс модели, год создания	Разрешение атмосферного блока модели	Разрешение океанического блока модели	Ссылка на подробное описание
1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	BCC-CSM1.1, 2010	(2.8°×2.8°) L26	(0,3...1×1°) L40	Wu et al., 2010
2	National Center for Atmospheric Research, USA	CCSM4, 2010	(1.25°×0.9°) L27	(1.1°×0.3-0.6°) L60	Gent et al., 2011

3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia	CSIRO-Mk3.6.0, 2010	(1.9°×1.9°) L18	(1.9°×1.9°) L31	Jeffrey et al., 2013
4	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	GFDL-ESM2M, 2010	(2° ×2.5°) L24	(1°×0.3-1.0°) L50	Dunne et al., 2012
5	Met Office Hadley Centre, UK	HadGEM2-ES, 2009	(1.875°×1.25°) L38	(0.3-1 °×1.0°) L40	Jones et al., 2011
6	Institute Pierre-Simon Laplace, France	IPSL-CM5A-LR, 2010	(1.9°×3.75°) L39	(2°×2°) L31	Dufresne et al., 2013
7	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan	MIROC-ESM-CHEM, 2010	(2.8°×2.8°) L80	(1.4°×0.5°) L44	Watanabe et al., 2011
8	Meteorological Research Institute, Japan	MRI-CGCM3, 2011	(1.1°×1.1°) L48	(1°×0.5°) L51	Yukimoto et al., 2011
9	Norwegian Climate Centre, Norway	NorESM1-M, 2011	(2.5°×1.9°) L26	(1,125°×1,125°) L53	Bentsen et al., 2013

Горизонтальное разрешение атмосферного и океанического блоков GCMs характеризуется шагом сетки в градусах широты и долготы. Вертикальное разрешение (L) определяется числом уровней. Детальное описание моделей, включая методы параметризации физических процессов, коррекции потоков на границе атмосфера-океан и др., приведено на сайте <http://www-pcmdi.llnl.gov/>.

На основе информации, размещенной на портале Мирового центра данных по климату в Гамбурге [[www.dkrz.de](http://www.dkrz.de)], нами были созданы базы метеорологических данных расчетов по глобальным моделям климата для бассейна р. Амур. Для этого из набора многих переменных, рассчитанных по девяти выбранным климатическим моделям, были отобраны три

(среднесуточные значения приземной температуры и относительной влажности воздуха, интенсивности осадков), необходимые для задания граничных условий в откалиброванной гидрологической модели бассейна Амура. При этом на основе суточных данных об относительной влажности и температуре воздуха дефицит влажности рассчитывался с использованием формулы Магнуса.

Ансамбль данных за исторический период по большинству глобальных моделей климата содержит данные до 2006 г., а так как расчеты стока на XXI век предполагалось усреднять по двадцатилетним периодам, то в качестве базового был принят период 1986-2005 гг.

По оценкам МГЭИК GCMs с достаточно высоким уровнем достоверности в масштабах континентов воспроизводят наблюдаемые многолетние тренды приземной температуры воздуха, учитывая как ускорение темпов потепления с середины XX века, так и циклы похолодания, связанные, в частности, с извержениями крупных вулканов. При этом улучшилось качество моделирования региональной температуры воздуха моделями CMIP5, по сравнению с проектом CMIP3, и особенно важен прогресс для экстремальных климатических явлений [IPCC, 2013]. Нужно отметить, что с начала XXI века наблюдается замедление глобального потепления по сравнению с проекциями, рассчитанными по GCMs. В работе [Allen *et al.*, 2015] высказана гипотеза, что это стало результатом роста в верхних слоях атмосферы концентрации антропогенных и природных аэрозолей, микрочастицы которых рассеивают и отражают обратно в космос часть прямой солнечной радиации. В свою очередь, подобный эффект связан с тем, что меньший рост среднегодовых температур приводит к уменьшению количества и частоты осадков, которые очищают атмосферу Земли от взвесей.

Подробный анализ качества расчетов современного климата с помощью глобальных моделей климата CMIP5 сделан в V оценочном докладе МГЭИК [IPCC, 2013]. Кроме того, расчеты климата и его изменения на территории России описаны во Втором оценочном докладе Росгидромета и других публикациях. Для большей части территории России, по сравнению с данными реанализов, климатические модели занижают среднюю годовую температуру воздуха, особенно на ЕТР и Дальнем Востоке [Павлова и др., 2014]. На Азиатской части территории России имеется тенденция к завышению моделями количества осадков. Несмотря на то, что в целом произошло некоторое улучшение точности расчетов площади снежного покрова в моделях CMIP5, все же часть моделей для территории Китая и Монголии показывает неудовлетворительные результаты.

Все взаимосвязанные атмосферные процессы описаны в глобальных моделях климата в рамках замкнутой физической климатической системы Земли. Считается, что достоверность расчетов будущего климата определяется способностью моделей воспроизводить современное его состояние в соответствии с имеющимися данными наблюдений. Учитывая это, было важно

оценить точность воспроизведения выбранными GCMs климатических характеристик на водосборе р. Амур, т.е. на региональном масштабе (табл. 4.2.2). Для такой оценки были привлечены ряды данных наблюдений за среднесуточной температурой и влажностью воздуха, количеством осадков на 232 метеорологических станциях из архива ВНИИГМИ-МЦД за период 1986-2005 гг.

Таблица 4.2.2 – Среднегодовые за период 1986-2005 гг. средние по бассейну Амура метеорологические характеристики

Метеоинформация	Температура, °C	Осадки, мм	Дефицит, мБар
Данные наблюдений на метеостанциях бассейна	-0.53	551	3.39
BCC-CSM1.1	-2.87	569	1.20
CCSM4	-3.37	714	1.79
CSIRO-Mk3.6.0	-3.04	764	1.47
GFDL-ESM2M	-5.28	732	0.74
HadGEM2-ES	-4.60	766	1.29
IPSL-CM5A-LR	-3.66	625	1.52
MIROC-ESM-CHEM	-2.41	639	0.95
MRI-CGCM3	-5.64	657	1.27
NorESM1-M	-4.56	653	1.52
Среднее по ансамблю	-3.90	672	1.45

Анализ фактических среднегодовых значений температуры и дефицита влажности воздуха за период с 1986 по 2005 гг. показал положительные тренды на 0.9°C и 0.5 м Бар соответственно (Рисунки 4.2.1, 4.2.3). Также для этого двадцатилетнего периода характерен отрицательный тренд суммы осадков на 3 мм/год (Рисунок 4.2.2). Для бассейна Амура за период 1986-2005 гг. среднемноголетняя температура воздуха составила –0.53°C, сумма осадков 551 мм, дефицит влажности воздуха 3.39 мБар.

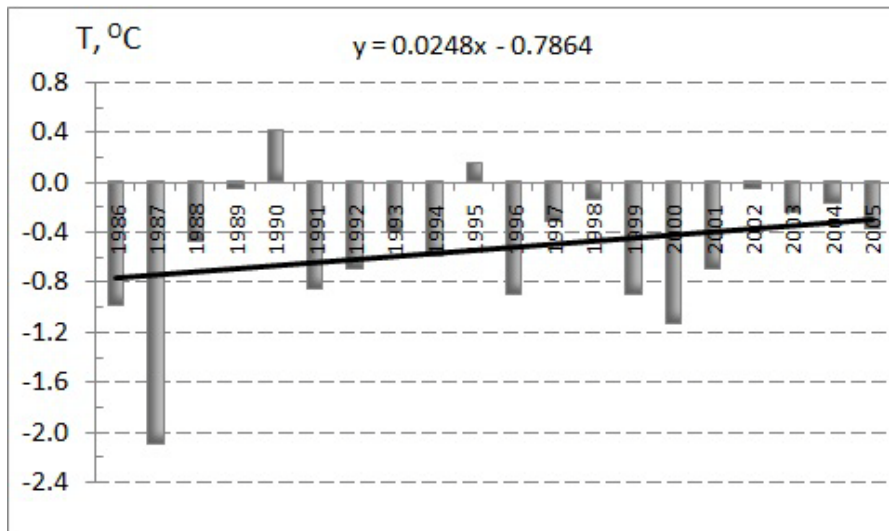


Рисунок 4.2.1 – Среднегодовая температура воздуха в бассейне р. Амур за период 1986-2005 гг.

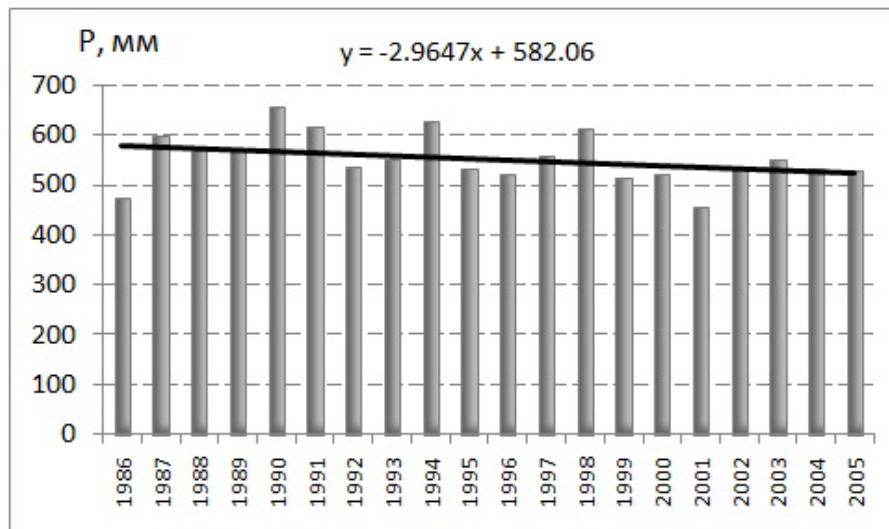


Рисунок 4.2.2 – Годовая сумма осадков в бассейне р. Амур за период 1986-2005 гг.

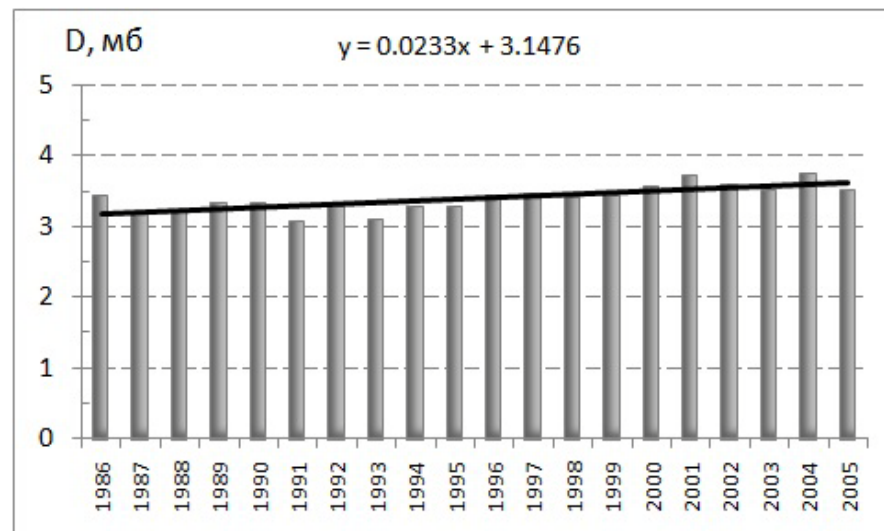


Рисунок 4.2.3 – Среднегодовой дефицит влажности воздуха в бассейне р. Амур за период 1986-2005 гг.

На рисунках 4.2.4–4.2.6 представлены внутригодовые распределения указанных выше метеовеличин, осредненные за период 1986-2005 гг. В целом сезонная изменчивость метеоэлементов практически аналогична внутригодовому распределению за 1994-2012 гг. во многом из-за значительного перекрытия двух рассматриваемых периодов. Небольшие различия связаны с уменьшением температуры воздуха зимой, ростом температуры на  $0^{\circ}\text{C}$  и, соответственно, испарения летом-осенью в 1994-2012 гг. Осадки наоборот уменьшились за летне-осенний период на 3-5 мм в разные месяцы.

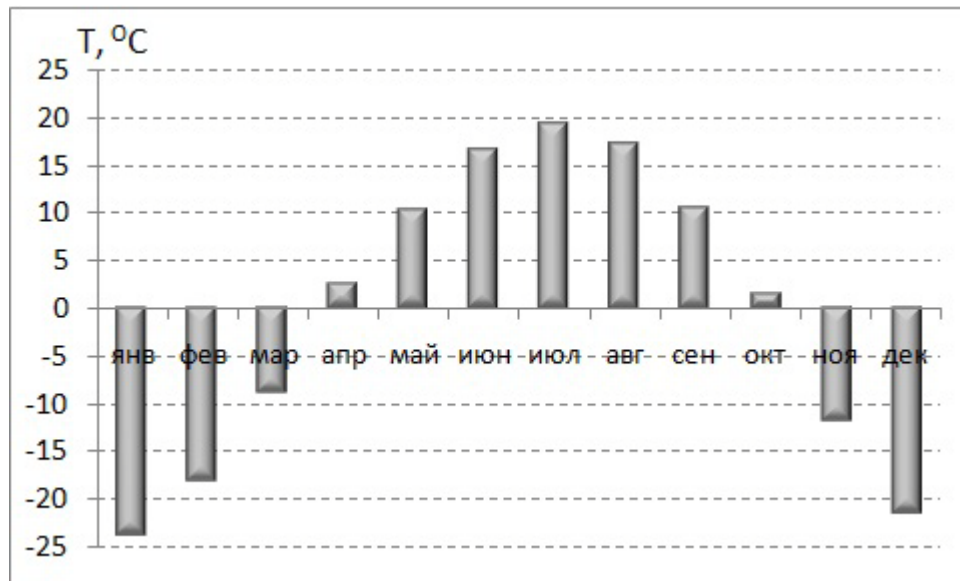


Рисунок 4.2.4 – Внутригодовое распределение температуры воздуха в бассейне р. Амур за период 1986-2005 гг.

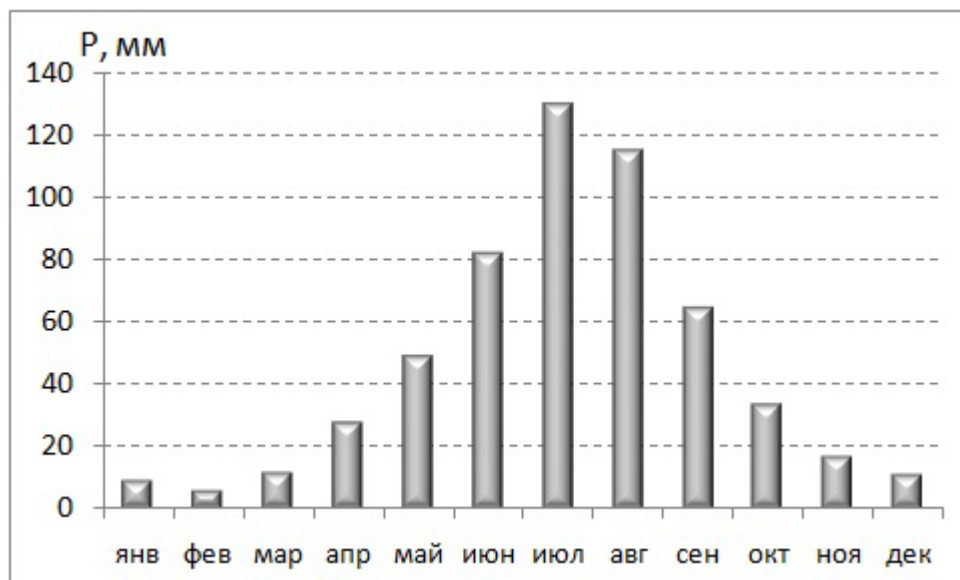


Рисунок 4.2.5 – Внутригодовое распределение осадков в бассейне р. Амур за период 1986-2005 гг.



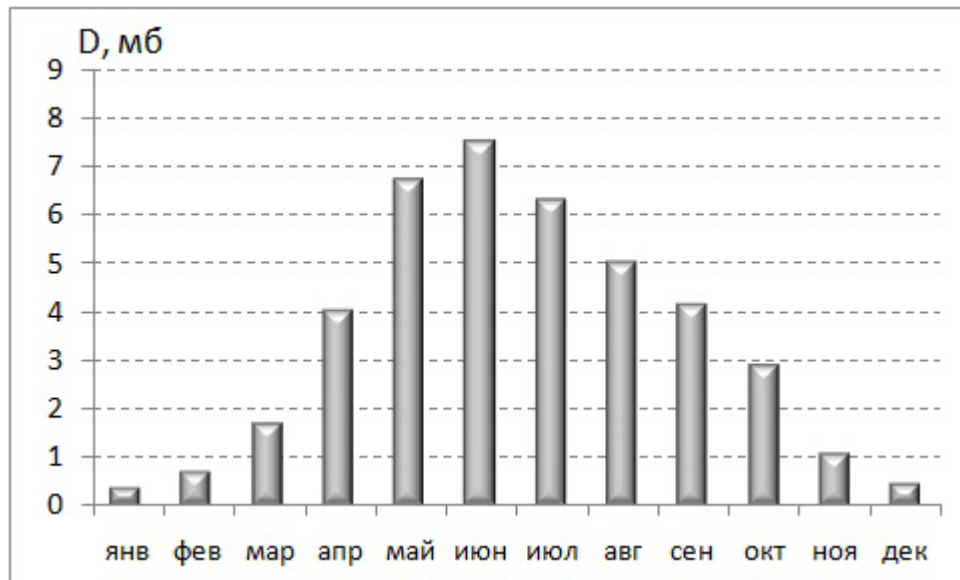


Рисунок 4.2.6 – Внутригодовое распределение дефицита влажности воздуха в бассейне р. Амур за период 1986-2005 гг.

По данным расчетов глобальных моделей климата среднегодовая температура и влажность воздуха, количество осадков, осредненные по бассейну р. Амур за исторический период, отклоняются от среднемноголетних значений метеозлементов, определенных по данным станционных наблюдений. Все девять GCMs для территории бассейна Амура занижают температуру и дефицит влажности воздуха, при этом завышая количество осадков (табл. 4.2.2). Таким образом, для использования данных расчетов GCMs в качестве входной информации в гидрологическую модель эти данные должны быть предварительно скорректированы.

Процедура коррекции данных GCMs для их использования в задачах оценки климатических воздействий – стандартная процедура, разные модификации которой широко распространены в приложениях GCMs. Как правило, коррекция состоит в минимизации систематической погрешности расчетов по GCMs (так называемая процедура «bias-correction») в сравнении с данными приземных метеорологических наблюдений или (чаще) с данными метеорологического реанализа. Процедура «bias-correction» широко применяется, например, при использовании данных расчетов GCMs в качестве краевых условий для региональных моделей климата [Bruyere et al., 2014], а также, все чаще, в гидрологических приложениях GCMs. Пример применения указанной процедуры содержится в нашей совместной статье [Gelfan et al., 2016].

В настоящей работе был применен метод коррекции рядов среднесуточных значений осадков, температуры и влажности воздуха, рассчитанных по девяти GCMs. Коррекция производилась с учетом разницы между среднемноголетними, осредненными по площади водосбора значениями перечисленных метеовеличин, определенными по данным метеорологических измерений на станциях за период 1986-2005 гг., и соответствующими

значениями, рассчитанными по каждой из GCMs. В смоделированные данные вводились корректирующие коэффициенты для осадков и дефицита влажности воздуха в процентах, для температуры воздуха в градусах Цельсия с целью приведения среднесезонных, осредненных по площади бассейна Амура, рассчитанных значений к средней наблюдаемой температуре воздуха  $-0.53^{\circ}\text{C}$ , сумме осадков за год 551 мм и среднему дефициту влажности воздуха 3.39 мБар. Таким образом, мы использовали наиболее «мягкий» вариант коррекции: корректировались только средние годовые значения соответствующих метеовеличин.

Для оценки точности расчета отдельных метеохарактеристик с помощью GCMs в климатологии часто применяют метод диаграмм Тейлора [Taylor, 2000], который показывает соотношение коэффициента корреляции между расчетной и фактической величиной и среднеквадратического отклонения, нормированного относительно среднеквадратического отклонения фактической величины.

Для пространственно-временной количественной оценки воспроизведения хода метеоэлементов климатическими моделями в пределах бассейна Амура были построены диаграммы Тейлора по температуре воздуха и осадкам. По рисункам 4.2.7, 4.2.8 может быть оценена пространственная составляющая качества расчета климатических характеристик в пределах бассейна Амура по среднесезонным (за базовый период 1986-2005 гг.) полям температуры воздуха и суммы осадков, рассчитанным с помощью модели формирования стока по элементарным водосборам для всего бассейна.

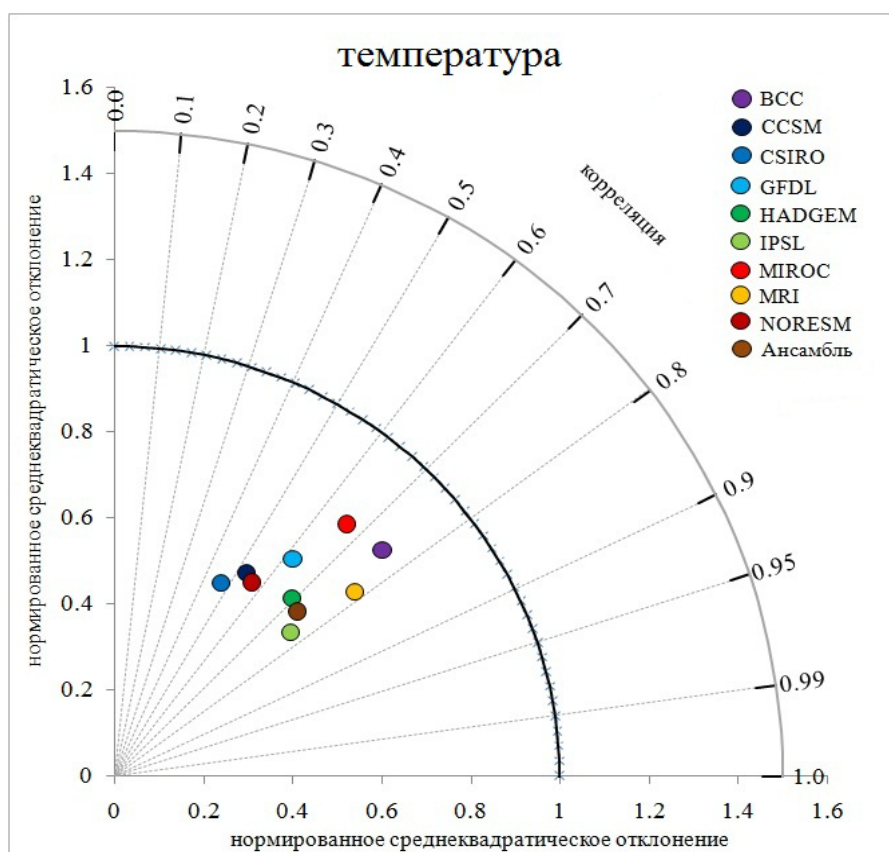


Рисунок 4.2.7 – Диаграмма Тейлора, построенная по среднегодовой рассчитанной по элементарным водосборам температуре воздуха за период 1986-2005 гг.

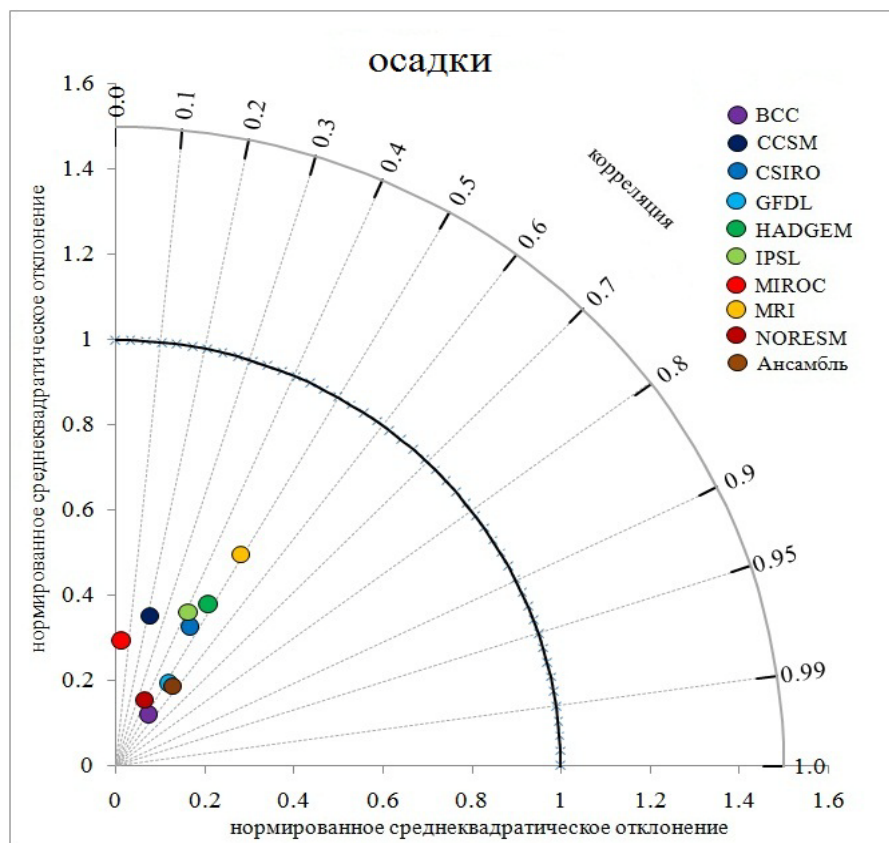


Рисунок 4.2.8 – Диаграмма Тейлора, построенная по среднегодовой рассчитанной по элементарным водосборам сумме осадков за период 1986-2005 гг.

Из рисунков 4.2.7, 4.2.8 видно, что пространственная изменчивость как для температуры воздуха, так и для осадков меньше, чем фактическая: по температуре от 0.5 до 0.8 от факта при среднеансамблевом значении 0.56, по осадкам от 0.2 до 0.6 от факта при среднеансамблевом значении 0.23. Пространственный коэффициент корреляции по температуре воздуха для отдельных GCMs составил от 0.5 до 0.8 при среднем по ансамблю 0.73. Коэффициент корреляции по осадкам для большинства GCMs составил от 0.4 до 0.5 (за исключением модели CCSM4 0.22 и MIROC-ESM-CHEM 0.05) при среднем по ансамблю 0.57. Подобный эффект во многом объясняется значительным пространственным разрешением в GCMs (порядка 100-200 км), которое не позволяет с высокой точностью воспроизвести поля распределения температуры воздуха и особенно осадков, учитывая что в бассейне Амура из-за сложного рельефа и процессов атмосферной циркуляции крайне значительная изменчивость осадков. К аналогичным выводам пришли авторы статьи [Болгов и др., 2015] в попытке выделить в пределах бассейна р. Амур районы с синхронными колебаниями количества осадков.

Кроме того, качество воспроизведения глобальными моделями среднего сезонного хода температуры и дефицита влажности воздуха, а также количества осадков на водосборе р. Амур можно оценить по рисункам 4.2.9-4.2.11.

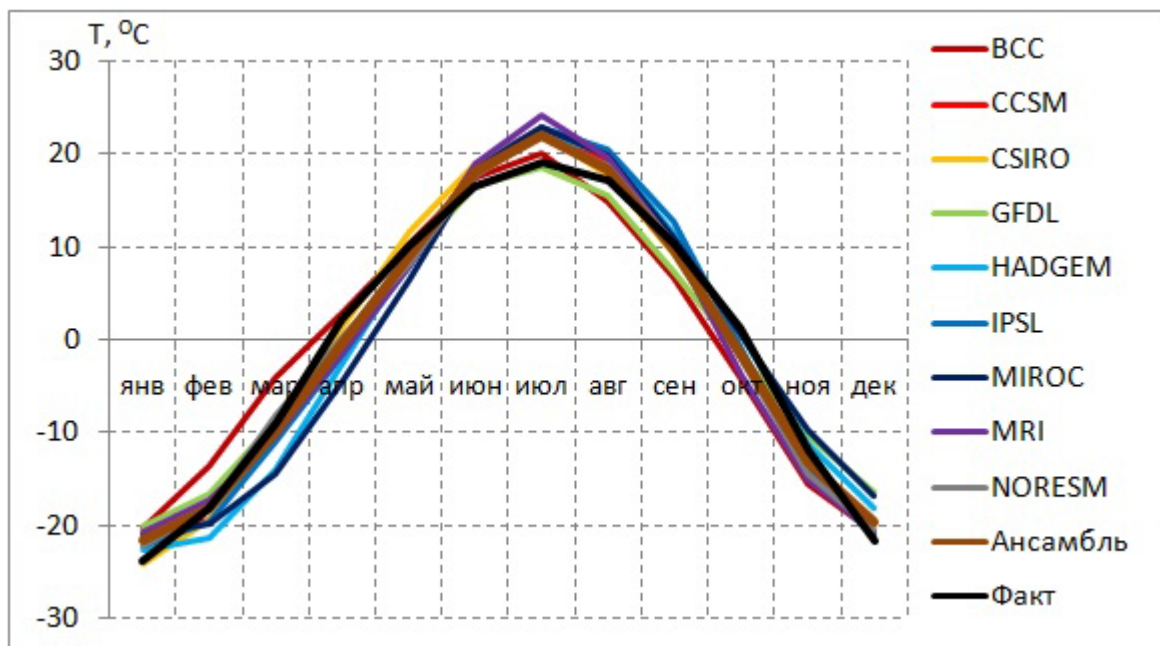


Рисунок 4.2.9 – Сезонный ход температуры воздуха в бассейне р. Амур по данным станционных наблюдений и глобальных моделей климата за период 1986-2005 гг.

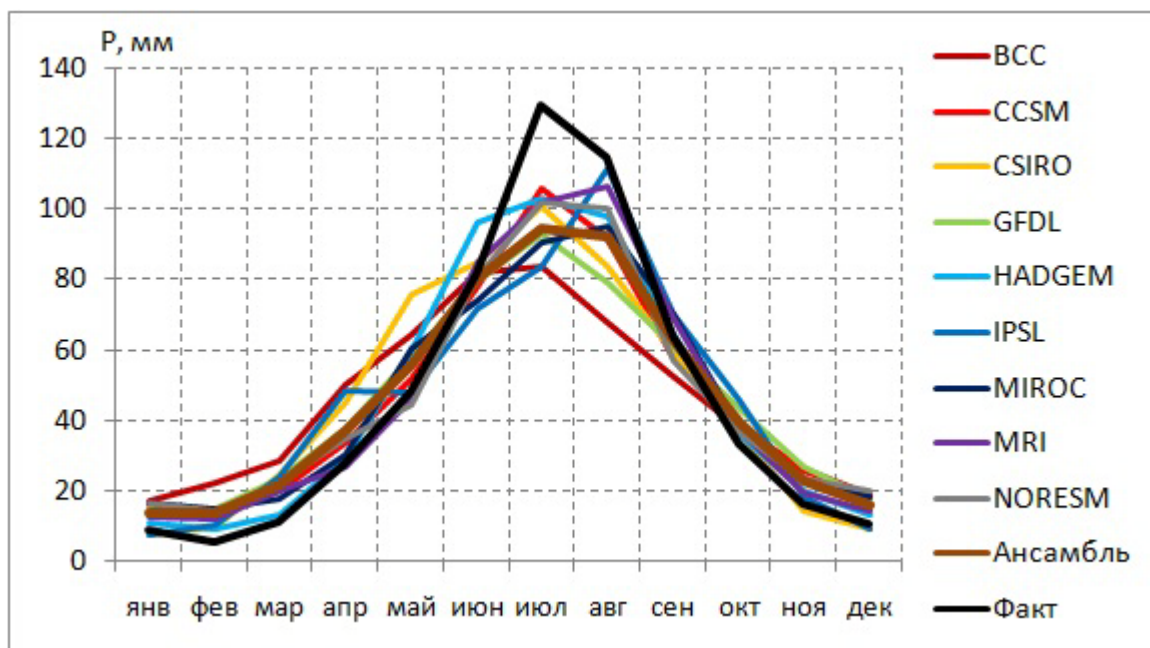


Рисунок 4.2.10 – Сезонный ход количества осадков в бассейне р. Амур по данным станционных наблюдений и глобальных моделей климата за период 1986-2005 гг.

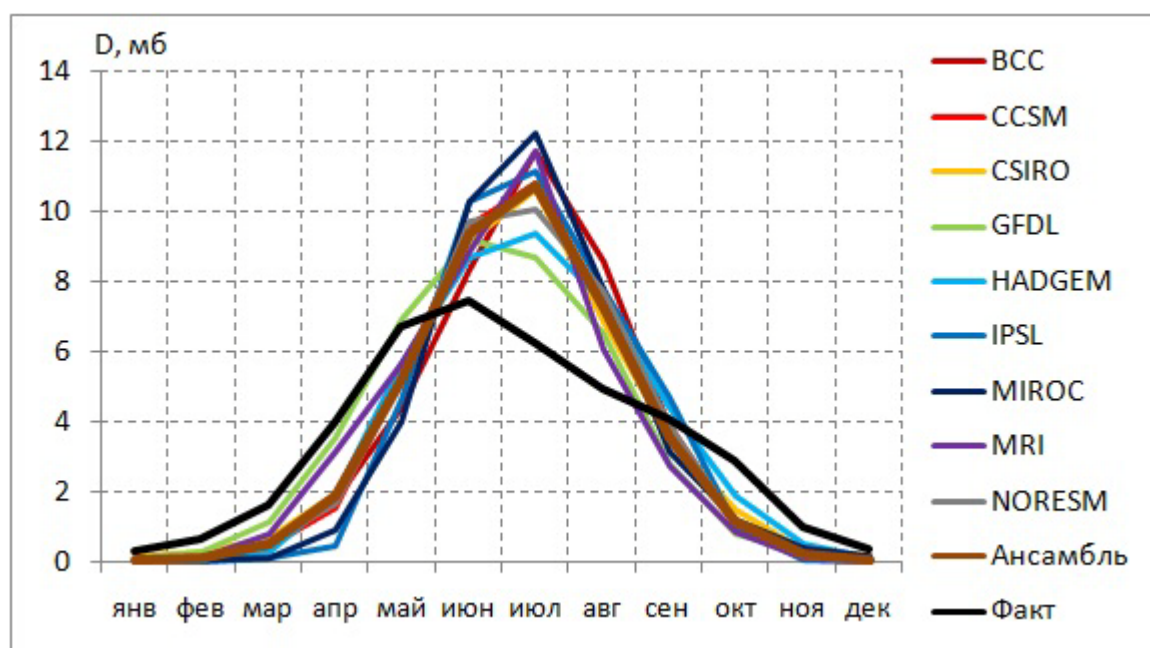


Рисунок 4.2.11 – Сезонный ход дефицита влажности воздуха в бассейне р. Амур по данным станционных наблюдений и глобальных моделей климата за период 1986-2005 гг.

Из рисунков 4.2.9-4.2.11 видно, что, как и следовало ожидать, использованная процедура «bias-correction» дает равные наблюдаемым среднегодовые значения рассматриваемых переменных, иными словами, площади под расчетными кривыми на рисунках 4.2.9-4.2.11 одинаковы и равны площадям под кривыми фактических значений. Неплохо воспроизводится моделями климата осредненный сезонный ход температуры воздуха. В то же время, имеются заметные расхождения в сезонном ходе осадков и, особенно, дефицита влажности воздуха. Можно предположить, что из-за большой пространственной сглаженности модельного климата



использование глобальных климатических моделей при оценке регионального климата в бассейне р. Амур осложняется занижением его естественной изменчивости и недооценкой экстремальных явлений. Особенно это проявляется для осадков в летне-осенний период паводков, когда в бассейне Амура проходит серия циклонов, а GCMs воспроизводят меньшее количество осадков, чем по данным наблюдений на метеостанциях. Проблема сглаженности полей метеохарактеристик возникает из-за недостаточного разрешения глобальных моделей и, соответственно, недоучета при расчетах влияния региональных особенностей довольно сложной атмосферной циркуляции в бассейне Амура.

Скорректированные данные расчета по GCMs рядов среднесуточных метеорологических величин задавались в качестве входных данных в модель формирования стока р. Амур. Естественно, погрешности воспроизведения сезонного хода метеорологических величин по сравнению с данными наблюдений отражаются на оценке сезонных изменений речного стока. По сравнению с фактическим стоком Амура среднемноголетние гидрографы, рассчитанные по скорректированным данным климатических моделей за исторический период, показывают завышение стока при прохождении волны половодья и занижение стока в период летне-осенних паводков (Рисунок 4.2.12). Такая картина объясняется сезонным ходом метеоэлементов в бассейне Амура: для периода с октября по май по данным GCMs характерно увеличение количества осадков и уменьшение испарения, с июня по сентябрь наоборот уменьшение количества осадков и увеличение испарения по сравнению со среднебассейновыми метеовеличинами, определенными по данным станционных наблюдений. Заметим, что сходные погрешности расчета сезонного стока р. Амур по климатическим моделям показаны в работе [Мохов и др., 2014].

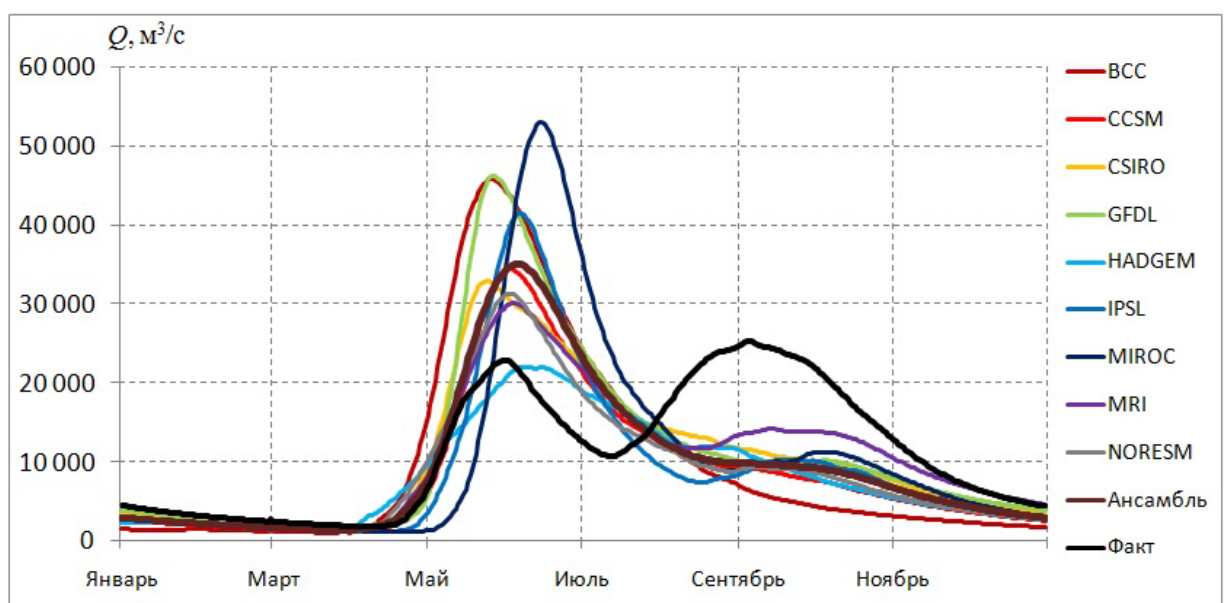


Рисунок 4.2.12 – Среднемноголетние гидрографы стока Амура, рассчитанные при использовании скорректированных данных глобальных моделей климата за 1986-2005 гг.



С помощью описанного выше способа оценки качества расчета метеохарактеристик по диаграммам Тейлора был построен аналогичный график для стока р. Амур (Рисунок 4.2.13).

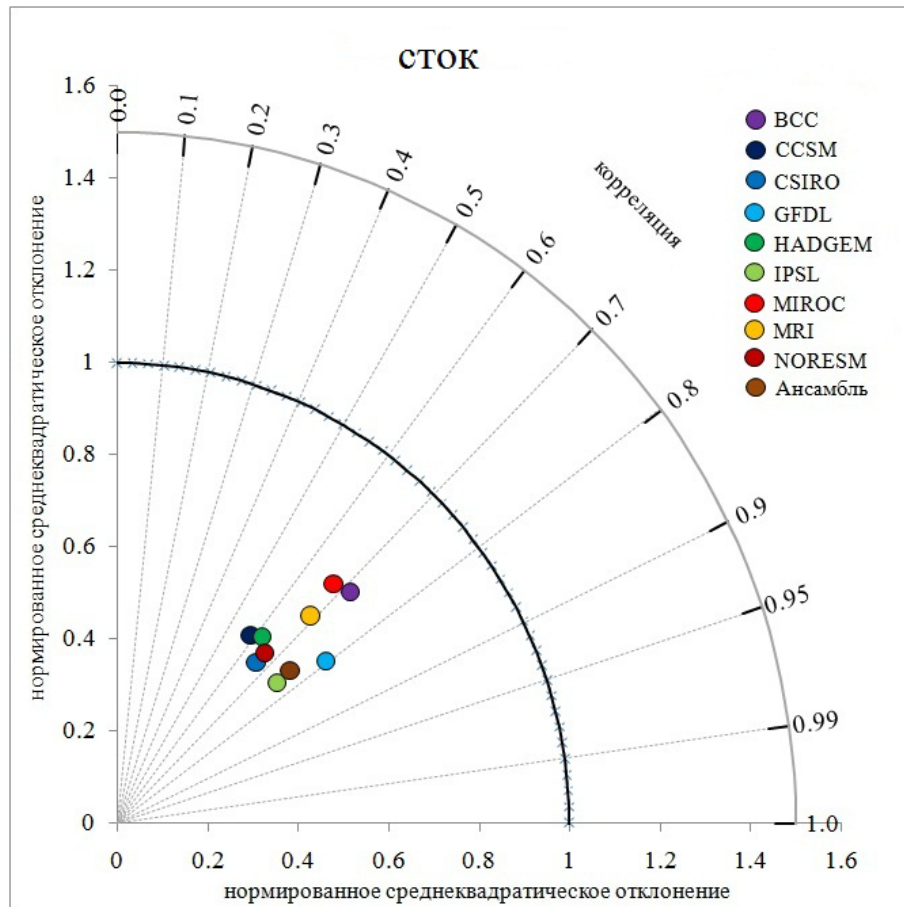


Рисунок 4.2.13 – Диаграмма Тейлора, построенная по среднегодовому рассчитанному по элементарным водосборам слою стока за период 1986-2005 гг.

Из рисунка 4.2.13 видно, что пространственная изменчивость для слоя стока также как и для температуры воздуха и осадков меньше, чем фактическая: от 0.4 до 0.7 от рассчитанного по данным станционных наблюдений при среднеансамблевом значении 0.5, что объясняется значительным пространственным расчетным разрешением метеохарактеристик в GCMs. Пространственный коэффициент корреляции по слою стока для отдельных GCMs довольно высок и составил от 0.6 до 0.8 при среднем по ансамблю 0.76.

Несмотря на погрешности воспроизведения сезонного хода метеоэлементов в бассейне р. Амур отдельными GCMs, результаты проведенного пространственно-временного анализа с помощью диаграмм Тейлора позволяют использовать выбранный ансамбль для оценки климатически обусловленных изменений стока, особенно в среднемноголетнем разрешении.

В отличие от сезонного стока результаты оценки годового стока с использованием данных климатических моделей за исторический период оказались значительно лучше. Рассчитанный среднемноголетний сток р. Амур по данным наблюдений на метеостанциях без учета водохранилищ за период 1986-2005 гг. составляет 359 км<sup>3</sup>. Относительная погрешность

расчета речного стока по данным выбранных девяти глобальных моделей климата составила в среднем 14% (табл. 4.2.3). Коэффициент вариации стока, рассчитанный за двадцатилетний период по данным стационарных наблюдений, составил 0.18, а средняя погрешность его определения по данным климатических моделей составила 13%. В обоих случаях величины, рассчитанные по данным GCMs, находятся в пределах 99%-го диапазона их выборочной изменчивости по данным наблюдений.

Таблица 4.2.3 – Результаты расчета среднегогодежного объема стока р. Амур по данным глобальных моделей климата

Модель	Сток, км <sup>3</sup>	Относительная погрешность расчета стока, %	Коэффициент вариации
BCC-CSM1.1	320	-10.9	0.20
CCSM4	283	-21.1	0.19
CSIRO-Mk3.6.0	325	-9.4	0.22
GFDL-ESM2M	353	-1.6	0.18
HadGEM2-ES	264	-26.5	0.22
IPSL-CM5A-LR	290	-19.4	0.18
MIROC-ESM-CHEM	339	-5.6	0.22
MRI-CGCM3	339	-5.7	0.21
NorESM1-M	280	-22.1	0.21
Ансамбль	310	-13.6	0.22
Фактические данные	359		0.18

Из характерных для климатической системы нелинейности и стохастичности, неполноты информации о ее начальном состоянии и внешних воздействиях следует, что в результате расчетов по моделям не могут быть получены климатические изменения точно в соответствии с наблюдаемыми [Спорышев и др., 2012.]. Кроме того, для каждой отдельной климатической модели присущие ей систематические ошибки во многом являются случайными по отношению к среднеансамблевым характеристикам, где они компенсируют друг друга. Поэтому при анализе качества модельных расчетов объемов годового стока Амура был сделан акцент на соответствии среднего по ансамблю моделей и наблюдаемого изменения стока с вычислением среднеквадратического отклонения (Рисунок 4.2.14).

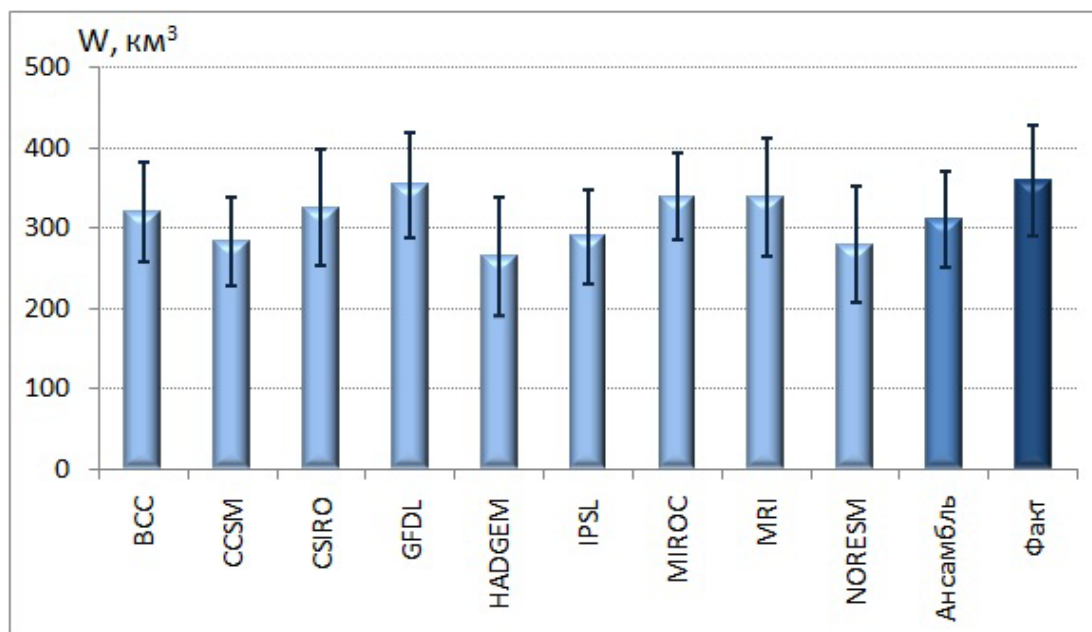


Рисунок 4.2.14 – Оценка среднегодового стока р. Амур по данным GCMs и ее стандартные погрешности

Помимо сопоставления средних значений и коэффициентов вариации годового стока, нами была оценена возможность воспроизведения по данным GCMs наблюдаемого тренда в ряду годового стока р. Амур. Для годового стока р. Амур, рассчитанного по данным наблюдений на метеостанциях, характерен отрицательный тренд  $-5 \text{ км}^3/\text{год}$ , а для фактического стока с учетом регулирования водохранилищами  $-3 \text{ км}^3/\text{год}$ . Также отрицательный тренд  $-1 \text{ км}^3/\text{год}$  получен путем осреднения расчетов по ансамблю GCMs, хотя и менее заметный (Рисунок 4.2.15). Вероятно, подобная разница объясняется ориентацией климатических моделей на воспроизведение эволюции климата на существенно более продолжительных временных масштабах, чем двадцать лет.

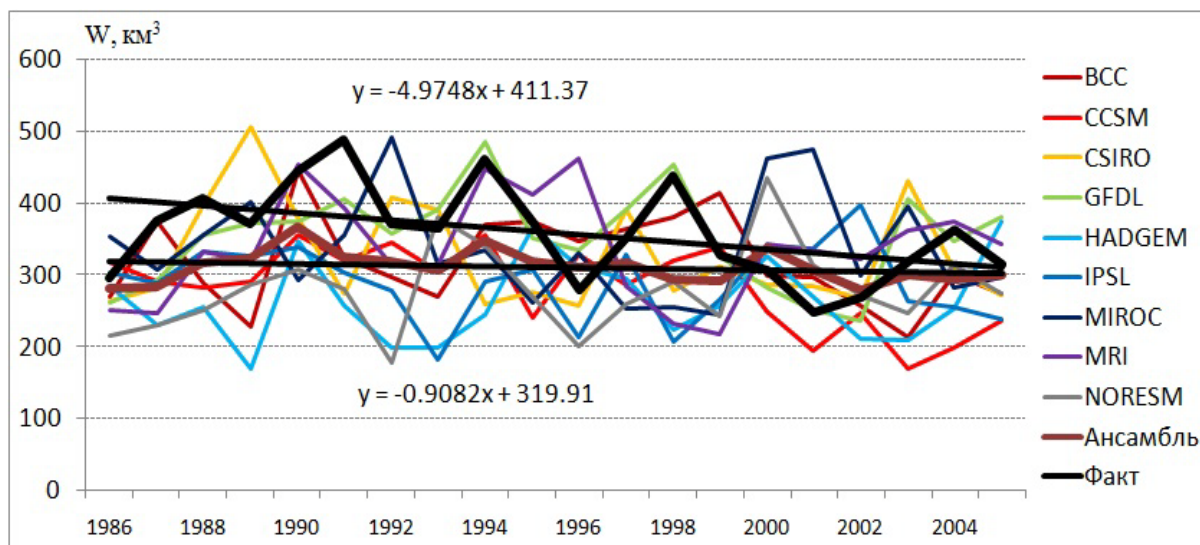


Рисунок 4.2.15 – Вариации рассчитанного годового стока р. Амур по данным глобальных моделей климата за период 1986-2005 гг.

При этом в отличие от оценок стока за исторический период нет достаточных оснований утверждать о превосходстве медианной модели над отдельными членами ансамбля при оценках будущих климатически обусловленных изменений стока р. Амур.

В последнее время во многих статьях обсуждается вопрос определения весовых коэффициентов при составлении ансамблей климатических моделей, в зависимости от качества моделирования климата для конкретных задач и территорий [Knutti, 2010; Knutti *et al.*, 2010; Weigel *et al.*, 2010]. Но при этом из-за слабой корреляции систематических ошибок расчета различных переменных по модели возникают сложности, и поэтому пока не существует эффективного метода отбора лучшей модели для достижения минимизации межмодельного разброса. В ряде случаев применим подход по выявлению модели, которая адекватнее воспроизводит колебания величин. Например, для отражения отрицательного тренда годового стока р. Амур за период с 1986 по 2005 гг. лучше подходят модели BCC-CSM1.1, CCSM4, CSIRO-Mk3.6.0, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM (Рисунок 4.2.16). При этом наиболее близкие результаты по абсолютной величине изменения стока по отношению к фактическому показали модели CCSM4 и CSIRO-Mk3.6.0. Среднее из ансамбля моделей точно не совпадает ни с одной из модельных реализаций, ни с данными наблюдений.

Также нами была оценена возможность воспроизведения с помощью модели формирования стока, использующей данные GCMs, кривых обеспеченности наблюдаемого годового стока р. Амур. Было построено распределение нормированных величин стока р. Амур (модульных коэффициентов) за исторический период, рассчитанных по данным каждой из GCMs. Нормированные величины стока вычислялись как отношение стока за конкретный год к среднемугодовому стоку за двадцать лет, определенному по каждой модели в отдельности. Далее кривые распределения нормированных величин стока по каждой из девяти GCMs (Рисунок 4.2.17а) и при объединении их в одну выборку (Рисунок 4.2.17б) сравнивались с модульными коэффициентами фактических величин стока. Из рисунка 4.2.17 видно, что распределение вероятности нормированных величин стока, рассчитанных по климатическим моделям, удовлетворительно совпадают с наблюдаемыми значениями.

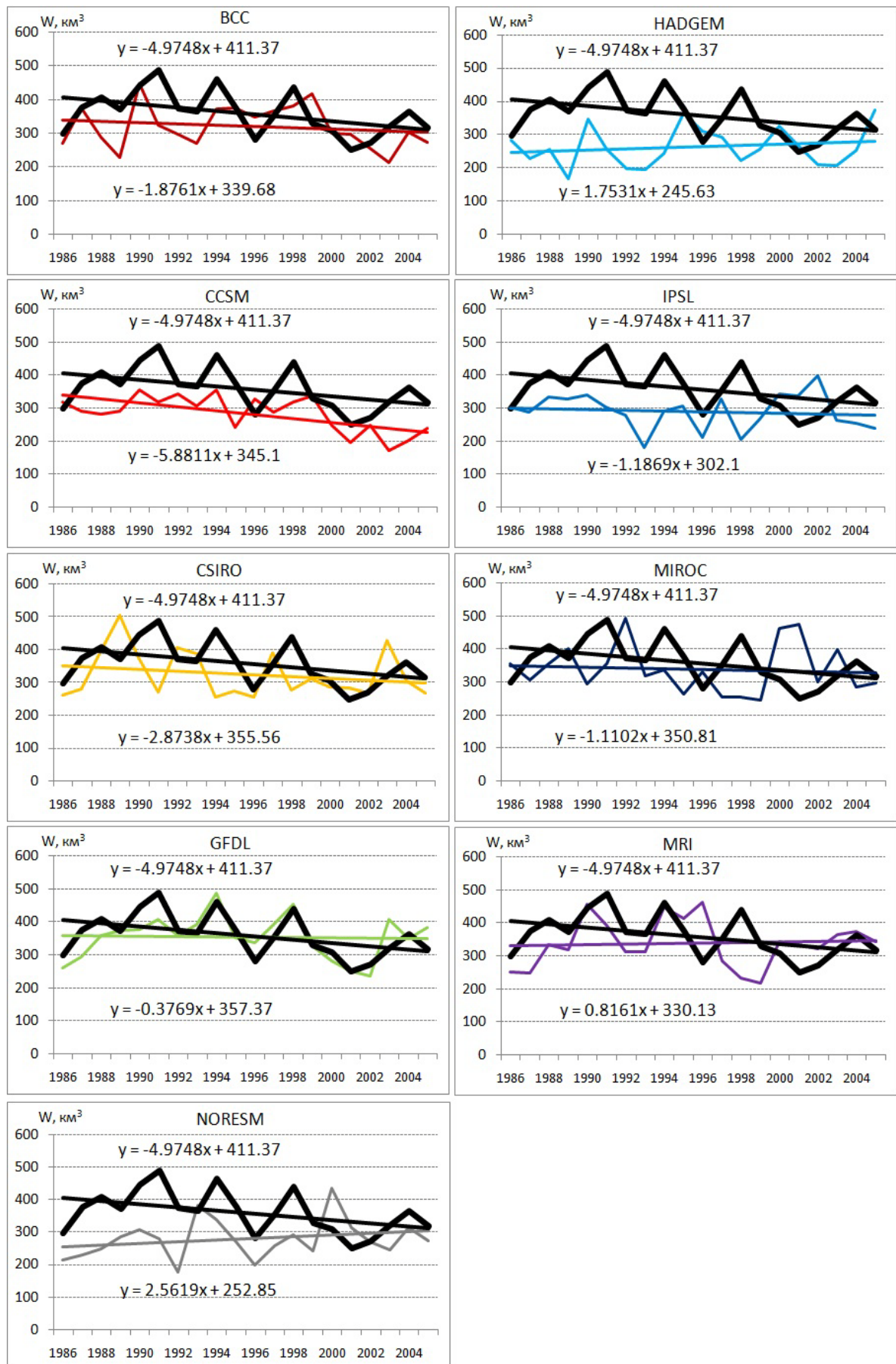


Рисунок 4.2.16 – Вариации рассчитанного годового стока р. Амур по данным наблюдений на метеостанциях и отдельным GCMs (прямые – линейный тренд)



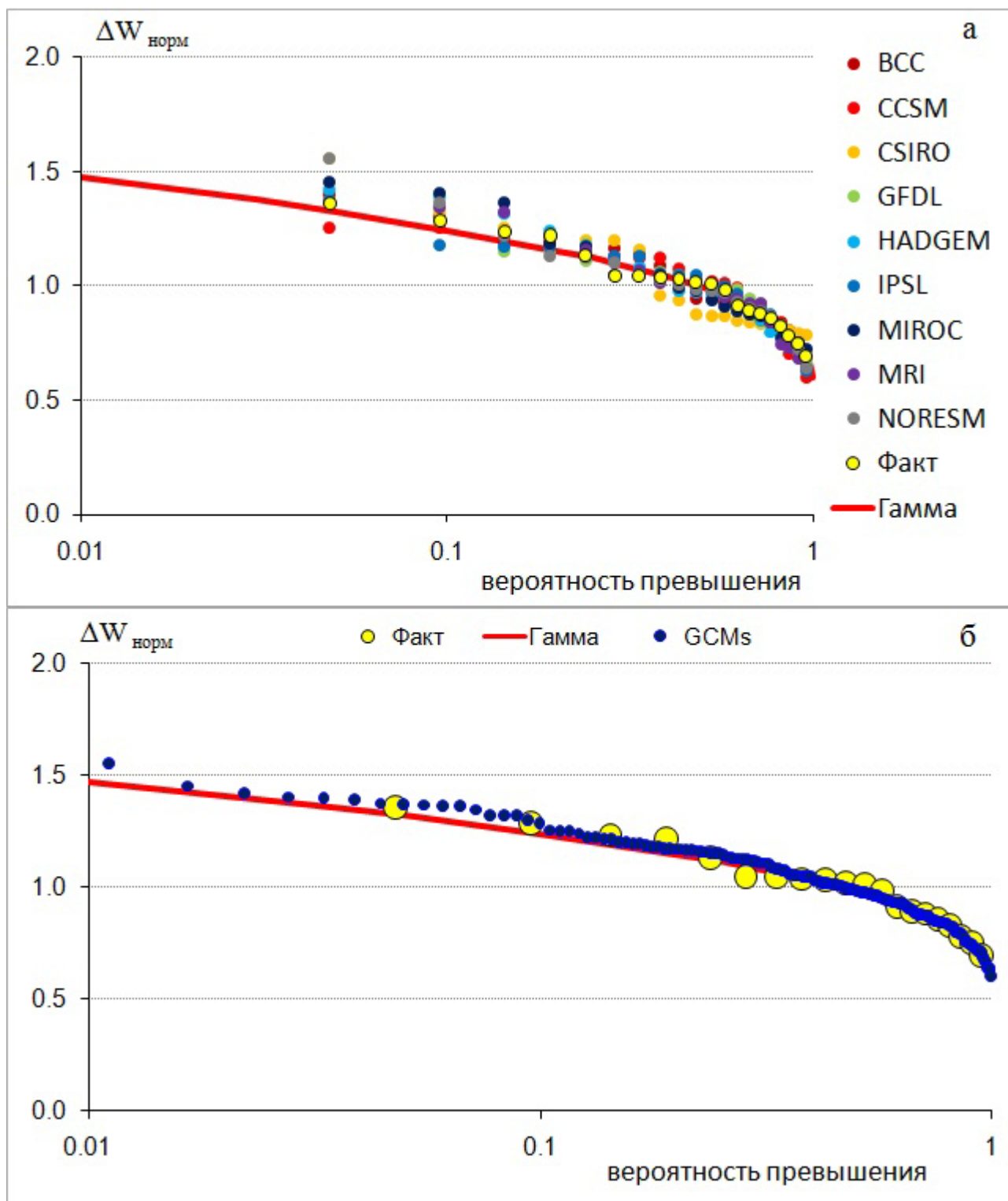


Рисунок 4.2.17 – Распределение относительных аномалий стока р. Амур за исторический период, рассчитанных по гидрологической модели с использованием данных отдельных GCMs (а) и объединенных в одну выборку (б). Желтые точки – фактические данные, красная линия – кривая гамма-распределения, подобранная по фактическим данным.

Проведенные исследования по сравнению средних годовых величин стока р. Амур, рассчитанных с помощью гидрологической модели по данным GCMs, с фактическими величинами стока показали, что несмотря на значительный разброс между отдельными



моделями CMIP5, удовлетворительное согласие средних по ансамблю моделей расчетов основных климатических характеристик и, как следствие, рассчитанного по гидрологической модели речного стока с данными наблюдений позволяют использовать рассмотренный ансамбль GCMs для оценок изменений климата и стока в бассейне р. Амур в XXI веке. Этот вопрос подробно рассмотрен в следующем разделе.

#### **4.3 Оценка возможных изменений климата и моделирование характеристик стока в бассейне р. Амур в XXI веке**

*Оценка возможных изменений климата в бассейне р. Амур в XXI веке по данным расчетов GCMs*

На основе данных девяти климатических моделей при четырех RCP-сценариях будущих антропогенных воздействий был получен ансамбль траекторий возможных изменений метеорологических величин в XXI веке с учетом тех же корректирующих коэффициентов, которые определены для базового исторического периода 1986-2005 гг.

В качестве климатических характеристик для оценки изменения климата использовались средняя по бассейну Амура температура воздуха и количество осадков. В результате оценивались аномалии температуры воздуха и суммы осадков как относительные отклонения (в градусах Цельсия для температуры, в процентах для осадков) от величины, оцененной для исторического периода 1986-2005 гг. ( $T = -0.53^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 551$  мм). На основе рассчитанных климатических проекций при разных сценариях радиационного форсинга (сценарная неопределенность возможных изменений климата) проведено усреднение аномалий метеохарактеристик по четырем отдельным двадцатилетним периодам XXI века (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079, 2080-2099 гг.).

На рисунках 4.3.1-4.3.4 приведены графики аномалий средней по бассейну Амура среднегодовой температуры воздуха в XXI веке для различных сценариев антропогенного воздействия. Для этого предварительно результаты ансамблевых расчетов были усреднены по каждому сценарию.

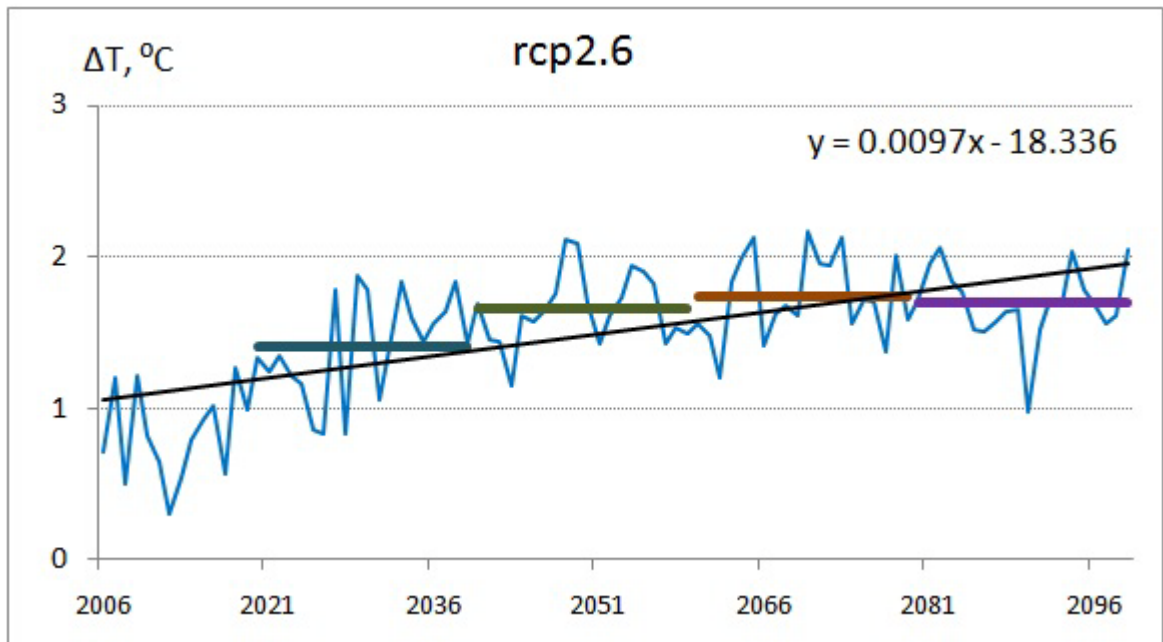


Рисунок 4.3.1 – Среднее по ансамблю GCMs изменение среднегодовой температуры воздуха в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp2.6 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

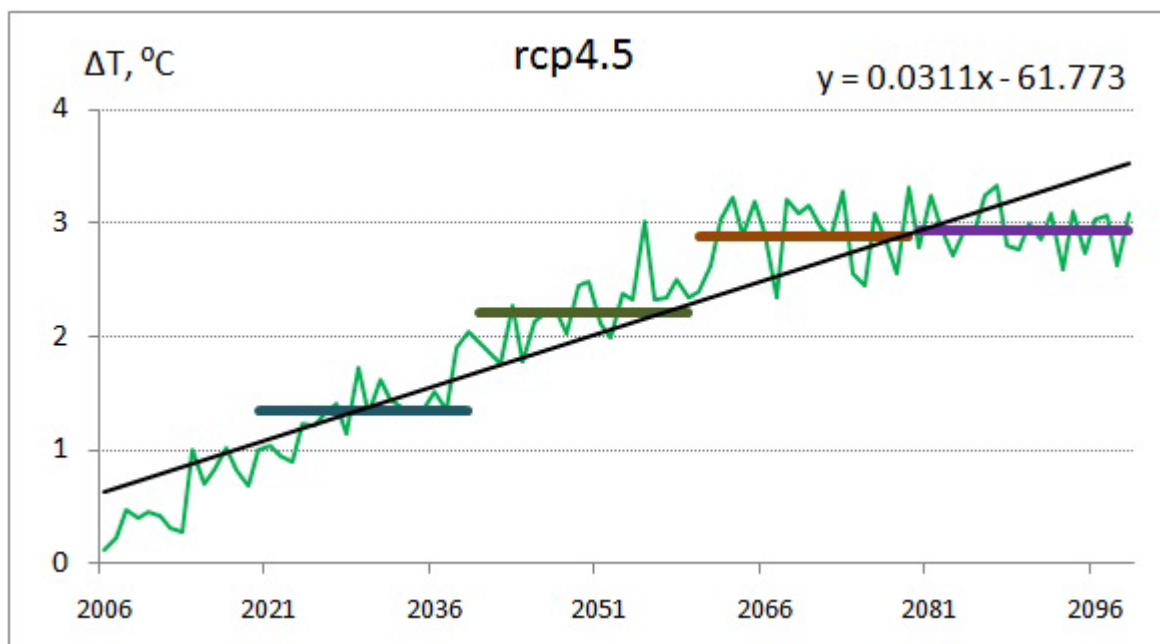


Рисунок 4.3.2 – Среднее по ансамблю GCMs изменение среднегодовой температуры воздуха в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp4.5 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

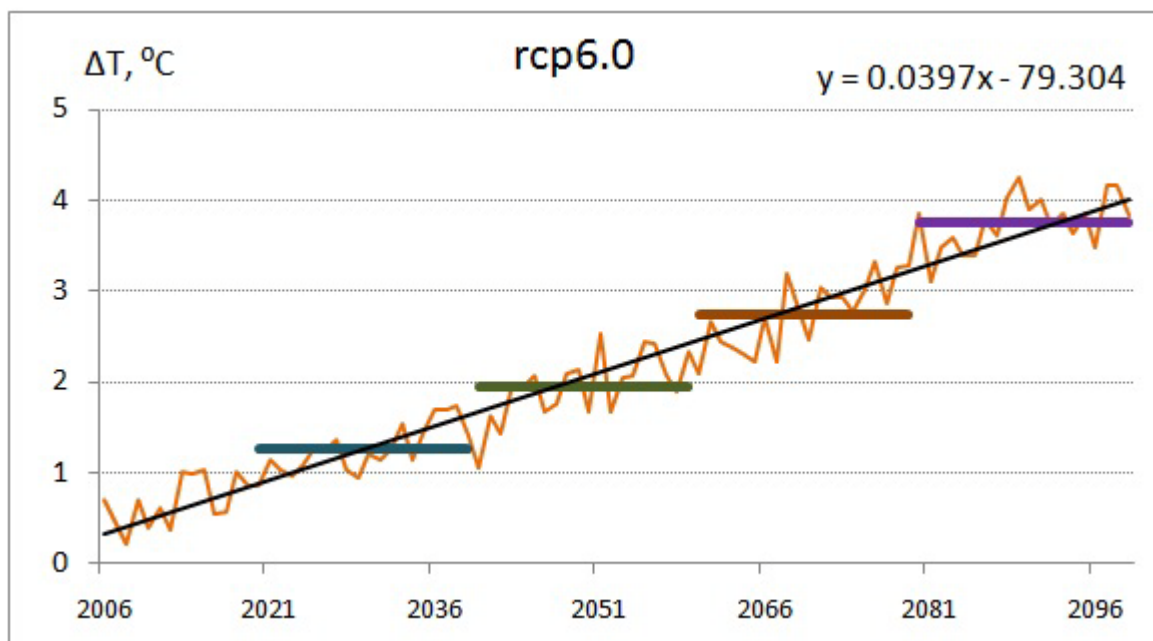


Рисунок 4.3.3 – Среднее по ансамблю GCMs изменение среднегодовой температуры воздуха в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp6.0 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

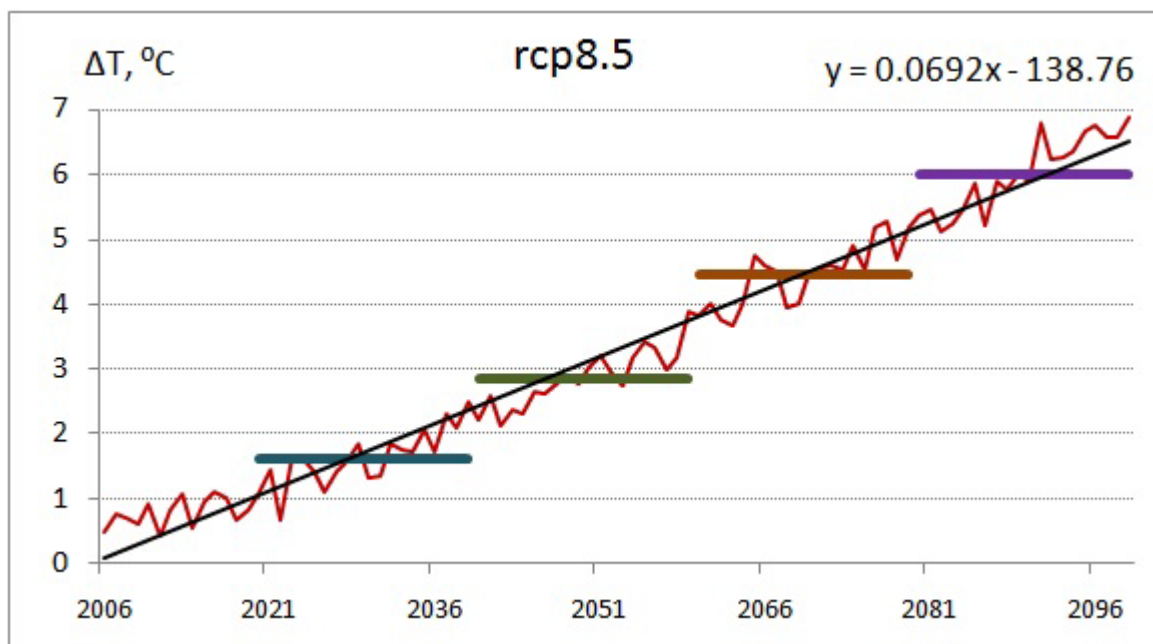


Рисунок 4.3.4 – Среднее по ансамблю GCMs изменение среднегодовой температуры воздуха в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp8.5 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

Тренд аномалии среднегодовой температуры воздуха при сценарии rcp2.6 составляет 1°C/100 лет, rcp4.5 – 3°C/100 лет, rcp6.0 – 4°C/100 лет, rcp8.5 – 7°C/100 лет. При анализе температуры, осредненной по двадцатилетним периодам, отмечено, что для консервативного сценария rcp2.6 и умеренного rcp4.5 характерно уменьшение скорости потепления вплоть до его прекращения в конце XXI века, а для среднего rcp6.0 и жесткого сценария rcp8.5 –

постоянный рост температуры в течение столетия (табл. 4.3.1, рисунок 4.3.5). При этом на общем фоне для всех сценариев выделяется наиболее интенсивное потепление в ближайший период 2020-2039 гг. относительно базового периода 1986-2005 гг.

Таблица 4.3.1 – Увеличение средней по бассейну Амура ансамблевой среднегодовой температуры воздуха (°C), осредненной по периодам XXI века, при различных RCP-сценариях

сценарий период	rcp2.6	rcp4.5	rcp6.0	rcp8.5
2020-2039	1.4	1.4	1.3	1.6
2040-2059	1.7	2.2	2.0	2.9
2060-2079	1.7	2.9	2.8	4.4
2080-2099	1.7	2.9	3.8	6.0

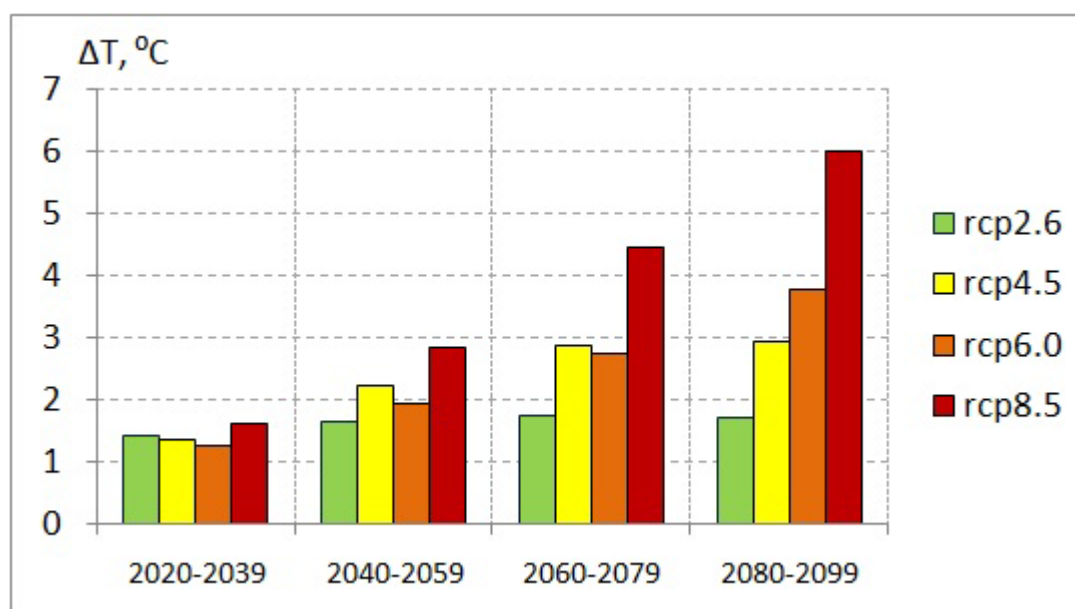


Рисунок 4.3.5 – Осредненное по 20-ти летним периодам среднее по ансамблю GCMs изменение среднегодовой температуры воздуха в бассейне р. Амур в XXI веке, рассчитанное при различных RCP-сценариях

Аналогично были получены результаты анализа ансамбля модельных расчетов для годового количества осадков. На рисунках 4.3.6-4.3.9 приведены графики аномалий среднего по бассейну Амура годового количества осадков в XXI веке при различных сценариях радиационного воздействия.

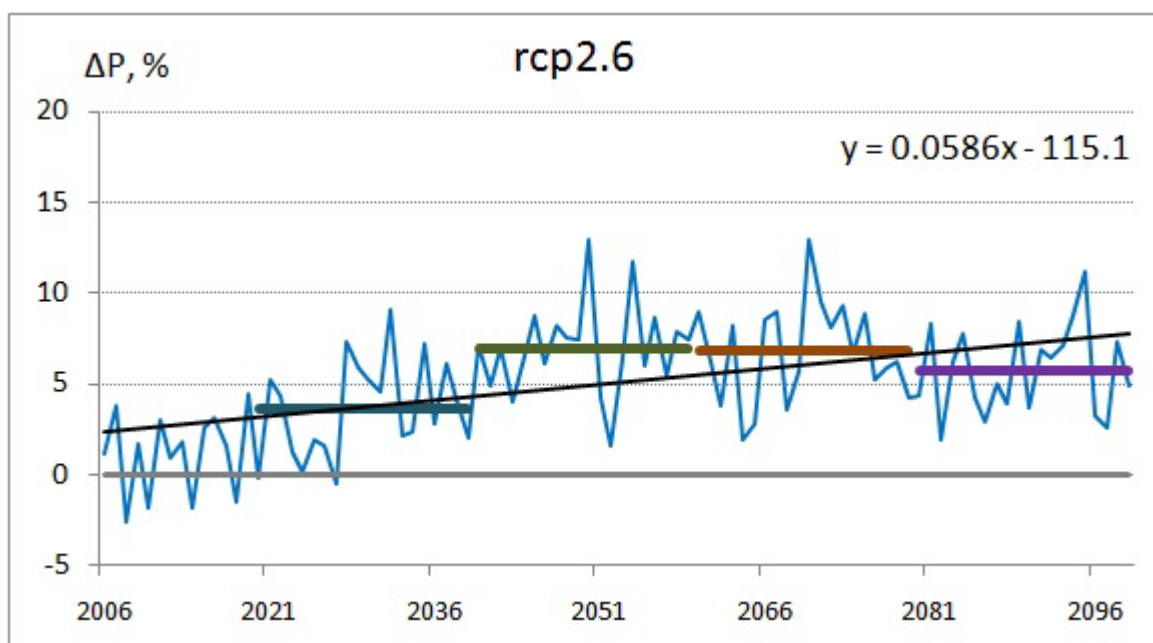


Рисунок 4.3.6 – Среднее по ансамблю GCMs изменение годового количества осадков в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp2.6 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

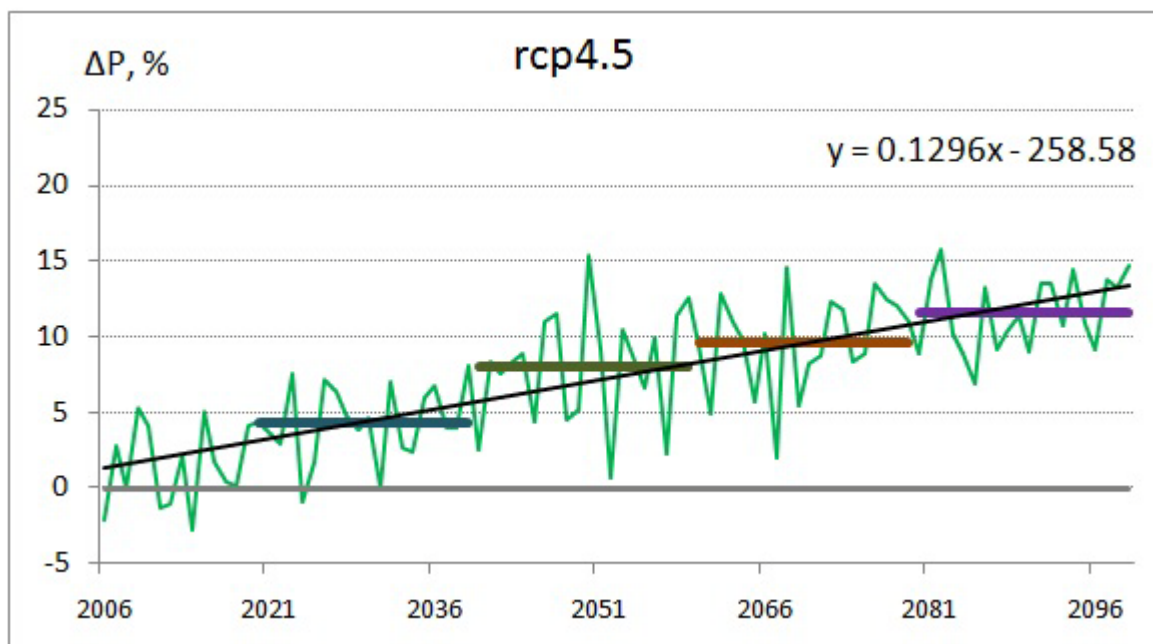


Рисунок 4.3.7 – Среднее по ансамблю GCMs изменение годового количества осадков в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp4.5 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

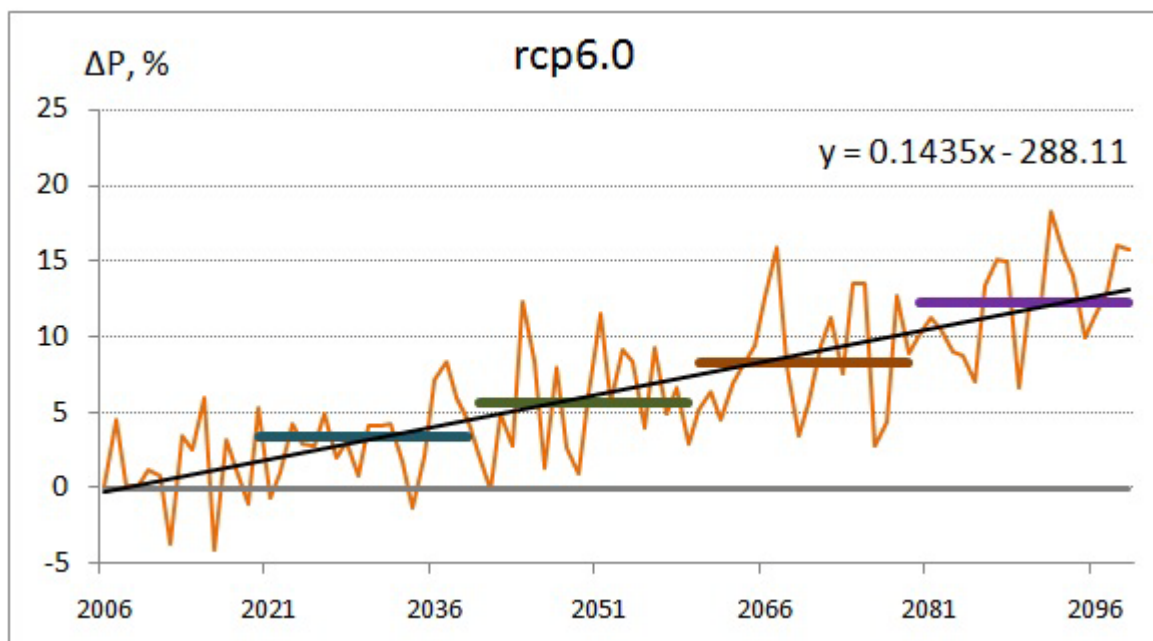


Рисунок 4.3.8 – Среднее по ансамблю GCMs изменение годового количества осадков в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp6.0  
(горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

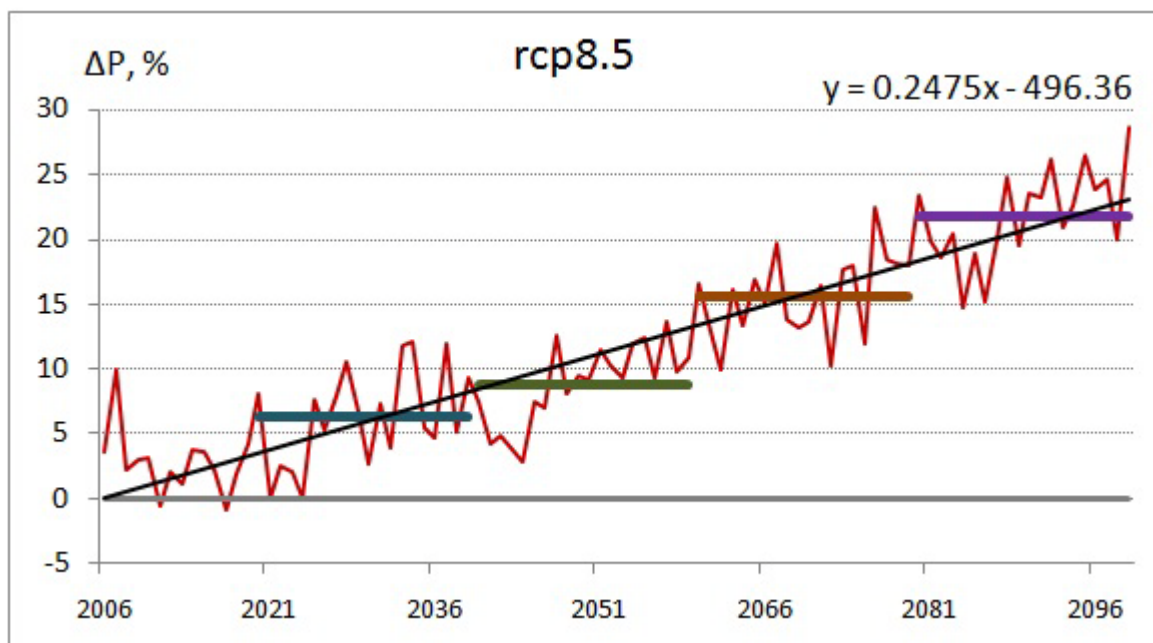


Рисунок 4.3.9 – Среднее по ансамблю GCMs изменение годового количества осадков в бассейне р. Амур в XXI веке для сценария rcp8.5  
(горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

Тренд аномалии годового количества осадков при сценарии rcp2.6 составляет 6%/100 лет, rcp4.5 – 13%/100 лет, rcp6.0 – 14%/100 лет, rcp8.5 – 24%/100 лет. Для всех сценариев тренды положительные. При анализе годового количества осадков, осредненного по двадцатилетним периодам, отмечено, что для консервативного сценария rcp2.6 характерно увеличение количества осадков до середины XXI века с последующим уменьшением (табл. 4.3.2, рисунок 4.3.10). При остальных сценариях наблюдается постепенный рост осадков в



течение столетия с увеличением скорости увлажнения от умеренного сценария к наиболее жесткому.

Таблица 4.3.2 – Увеличение среднего по бассейну Амура ансамблевого годового количества осадков (%), осредненного по периодам XXI века, при различных RCP-сценариях

сценарий период	rcp2.6	rcp4.5	rcp6.0	rcp8.5
2020-2039	3.6	4.3	3.4	6.3
2040-2059	7.0	8.0	5.6	8.8
2060-2079	6.8	9.6	8.2	15.6
2080-2099	5.8	11.6	12.2	21.7

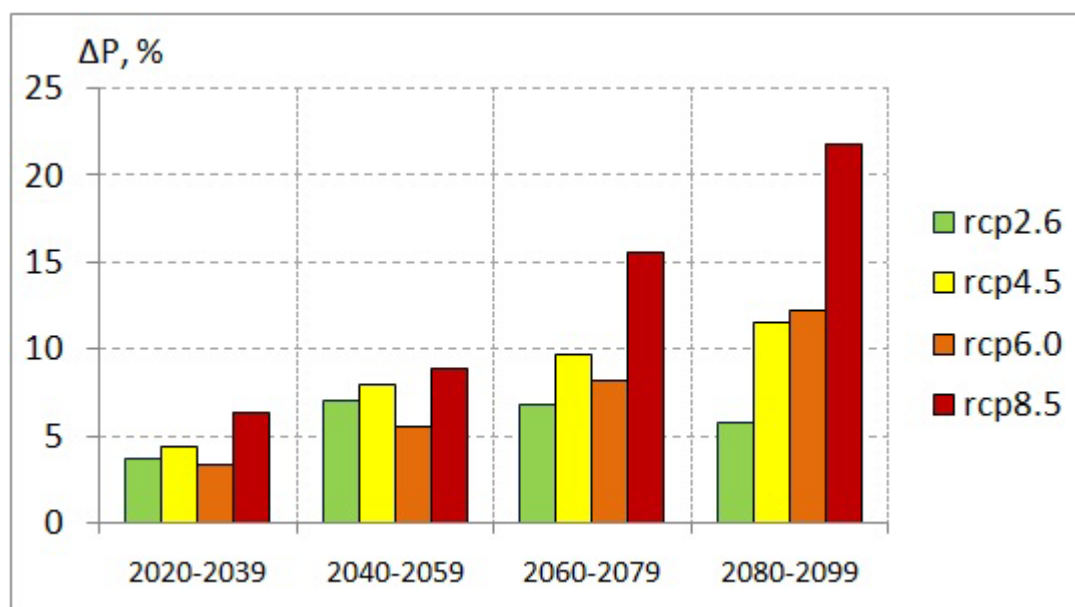


Рисунок 4.3.10 – Осредненное по 20-ти летним периодам среднее по ансамблю GCMs изменение годового количества осадков в бассейне р. Амур в XXI веке, рассчитанное при различных RCP-сценариях

Для уменьшения амплитуды ежегодных колебаний аномалий температуры воздуха и суммы осадков в бассейне Амура были построены 10-летние скользящие средние рассчитанных по GCMs проекций этих характеристик (Рисунки 4.3.11, 4.3.12). В этом случае по температуре воздуха существенное расхождение кривых для различных сценариев вероятно после 2040 г., а по количеству осадков – начиная со второй половины столетия, за исключением периода 2030-х гг., когда для жесткого сценария rcp8.5 отмечается более интенсивное увеличение осадков с последующим уменьшением. Траектории проекций аномалий температуры и осадков при сценариях rcp4.5 и rcp6.0 в целом схожи и несколько раз пересекаются.

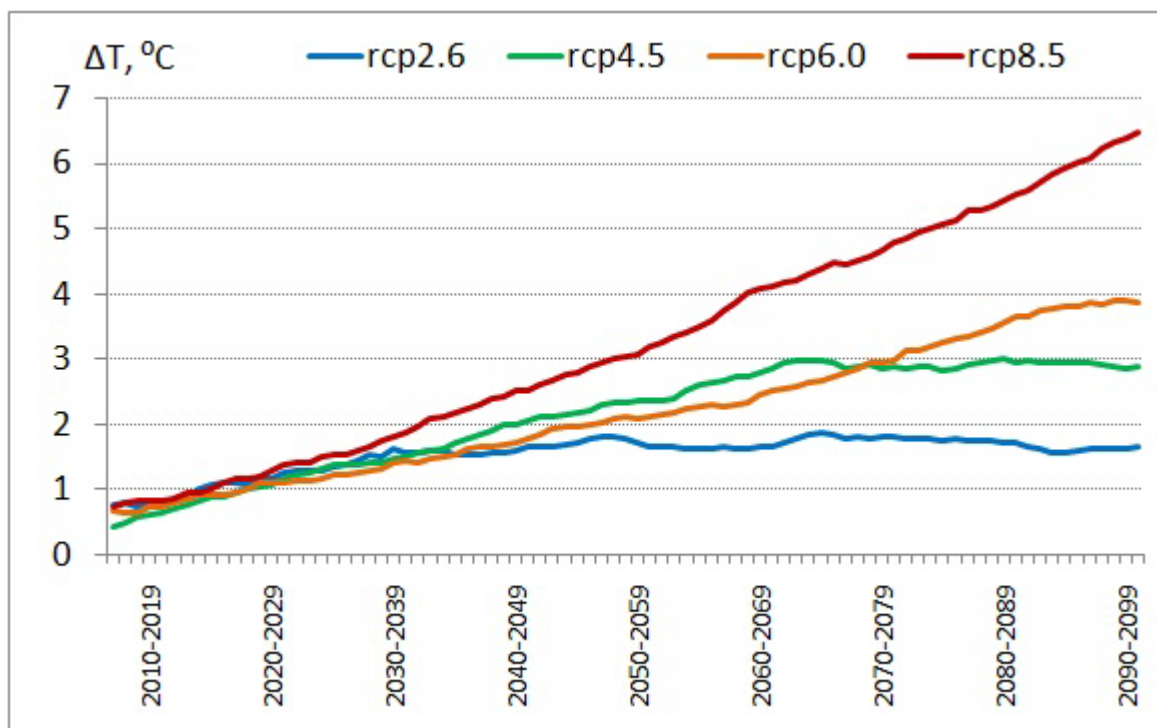


Рисунок 4.3.11 – 10-летние скользящие средние проекций увеличения средней по бассейну Амура ансамблевой среднегодовой температуры воздуха в XXI веке при различных RCP-сценариях

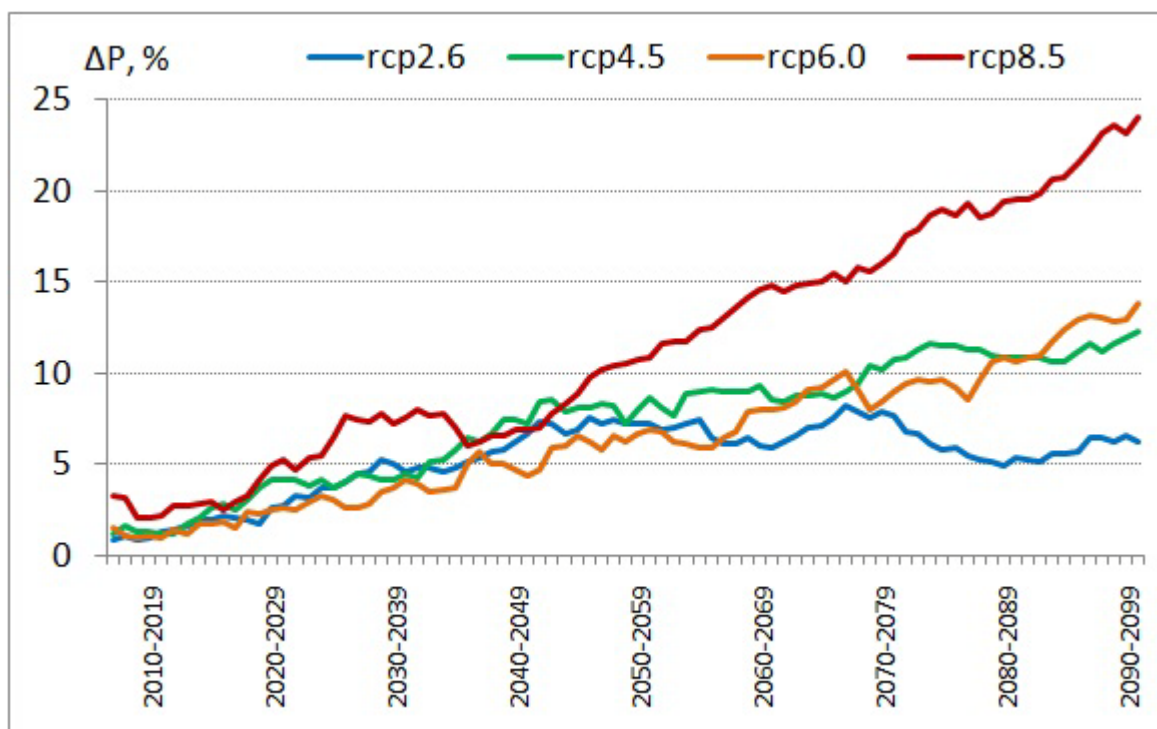


Рисунок 4.3.12 – 10-летние скользящие средние проекций увеличения среднего по бассейну Амура ансамблевого годового количества осадков в XXI веке при различных RCP-сценариях

В бассейне Амура вероятно увеличение общего количества осадков и продолжительности муссонного периода в результате способности атмосферы, температура которой существенно возрастет, удерживать большие объемы влаги.

Оценка значимости возможных изменений температуры воздуха и осадков в бассейне Амура проводилась путем вычисления критерия  $SNR$  (signal-to-noise, отношение сигнала к шуму), который широко используется в последние годы в климатологии для оценки значимости детерминистического антропогенного сигнала на фоне естественной стохастической изменчивости климата. Возможности применения этого критерия в гидрологии рассмотрены, например, в статье [Santer *et al.*, 2011]. В настоящей работе  $SNR$  нами рассчитывался как:

$$SNR = \frac{\bar{W}_{XXI} - \bar{W}_{ист}}{\sqrt{\sigma_{XXI}^2 + \sigma_{ист}^2}}, \quad (4.3.1)$$

где  $\bar{W}_{XXI}$  – среднемноголетнее значение характеристики за прогнозный период,  $\bar{W}_{ист}$  – среднемноголетнее значение характеристики за исторический период,  $\sigma_{XXI}$  – среднеквадратическое отклонение средней по ансамблю GCMs характеристики за прогнозный период,  $\sigma_{ист}$  – среднеквадратическое отклонение средней по ансамблю GCMs характеристики за исторический период.

Таким образом, величина  $SNR$  показывает, во сколько раз аномалия характеристики превышает ее изменчивость, обусловленную неопределенностью выбора моделей климата (модельную изменчивость). Если значение  $SNR > 1$ , то возможное изменение характеристики больше ее модельной изменчивости, следовательно, есть основания полагать, что это изменение обусловлено внешним по отношению к атмосфере детерминистическим сигналом.

Результаты расчетов критерия  $SNR$  для температуры воздуха и сумм осадков в бассейне Амура по двадцатилетним периодам XXI века как с учетом отдельных RCP-сценариев, так и всех вместе представлены в таблицах 4.3.3 и 4.3.4.

Таблица 4.3.3 – Критерий  $SNR$  для среднемноголетней температуры воздуха в бассейне Амура по двадцатилетним периодам XXI века с учетом различных RCP-сценариев

сценарий период	rcp2.6	rcp4.5	rcp6.0	rcp8.5	все сценарии
2020-2039	2.87	2.94	2.89	2.91	3.22
2040-2059	3.90	4.84	3.85	5.11	4.97
2060-2079	3.89	6.14	5.28	7.43	7.00
2080-2099	3.96	7.19	8.18	8.89	9.11

Таблица 4.3.4 – Критерий  $SNR$  для среднемноголетнего количества осадков в бассейне Амура по двадцатилетним периодам XXI века с учетом различных RCP-сценариев

сценарий период	rcp2.6	rcp4.5	rcp6.0	rcp8.5	все сценарии
2020-2039	0.91	1.14	0.88	1.33	1.33
2040-2059	1.80	1.67	1.21	2.08	2.06
2060-2079	1.69	2.21	1.57	3.59	3.06
2080-2099	1.50	3.01	2.83	4.69	3.70

В результате возможное изменение средней по бассейну Амура среднегодовой температуры воздуха превышает ее модельную изменчивость для всех периодов и всех RCP-сценариев. Изменение среднего по бассейну Амура годового количества осадков не превышает его модельную изменчивость только за период 2020-2039 гг. по 2.6 и 6.0 RCP-сценариям. Таким образом, можно ожидать, что глобальные антропогенные воздействия вызовут в бассейне Амура значимые изменения температуры воздуха и осадков во второй половине XXI века.

#### *Моделирование характеристик стока р. Амур в XXI веке*

По модели формирования стока в бассейне р. Амур, на входе которой задавались метеорологические величины, рассчитанные по девяти GCMs при определенном RCP-сценарии, был рассчитан соответствующий этим климатическим траекториям ансамбль многолетних гидрографов стока, т.е. размер ансамбля гидрографов для каждого из RCP-сценариев равен девяти, а всего было рассчитано  $9 \times 4 = 36$  гидрографов. На рисунке 4.3.13 представлены средние по ансамблю гидрографов стока величины годового стока Амура в XXI веке при различных сценариях радиационного воздействия.

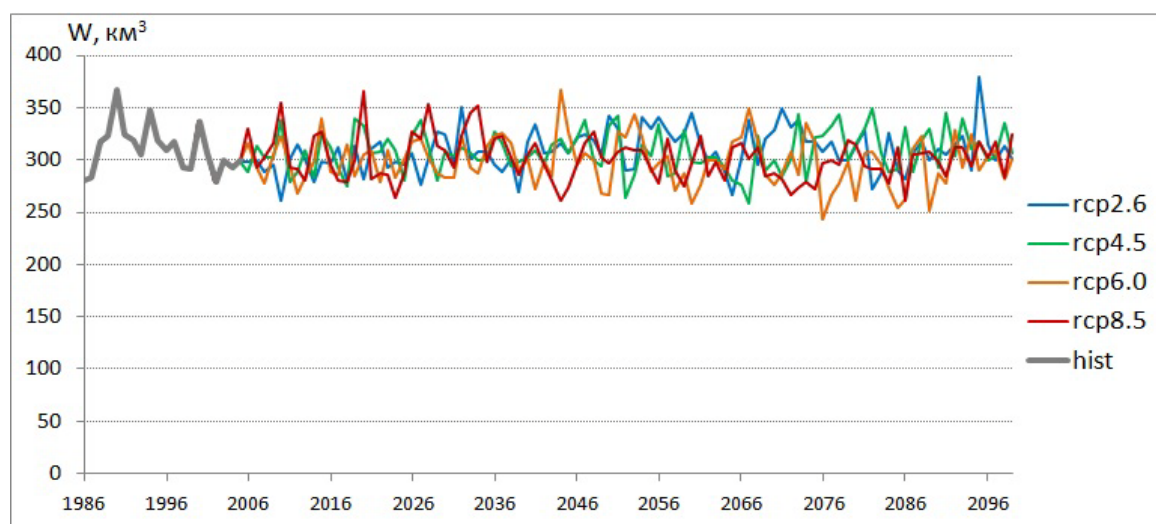


Рисунок 4.3.13 – Изменчивость среднего по ансамблю GCMs годового стока р. Амур в XXI веке при различных RCP-сценариях

По данным каждой GCM в отдельности были вычислены относительные аномалии стока р. Амур как отношение изменений рассчитанных среднегодовых значений стока за конкретный год к среднемноголетнему стоку за базовый период 1986-2005 гг. На рисунках 4.3.14–4.3.17 показаны графики относительных аномалий годового ансамблевого стока Амура в XXI веке для различных сценариев антропогенного воздействия. Тренд аномалии годового стока Амура при сценариях rcp2.6 и rcp4.5 положительный и составляет для rcp2.6 5%/100 лет, rcp4.5 2%/100 лет. Напротив, тренд аномалии годового стока Амура при сценариях rcp6.0 и rcp8.5 отрицательный и составляет для сценария rcp6.0 –4%/100 лет, rcp8.5 –6%/100 лет.

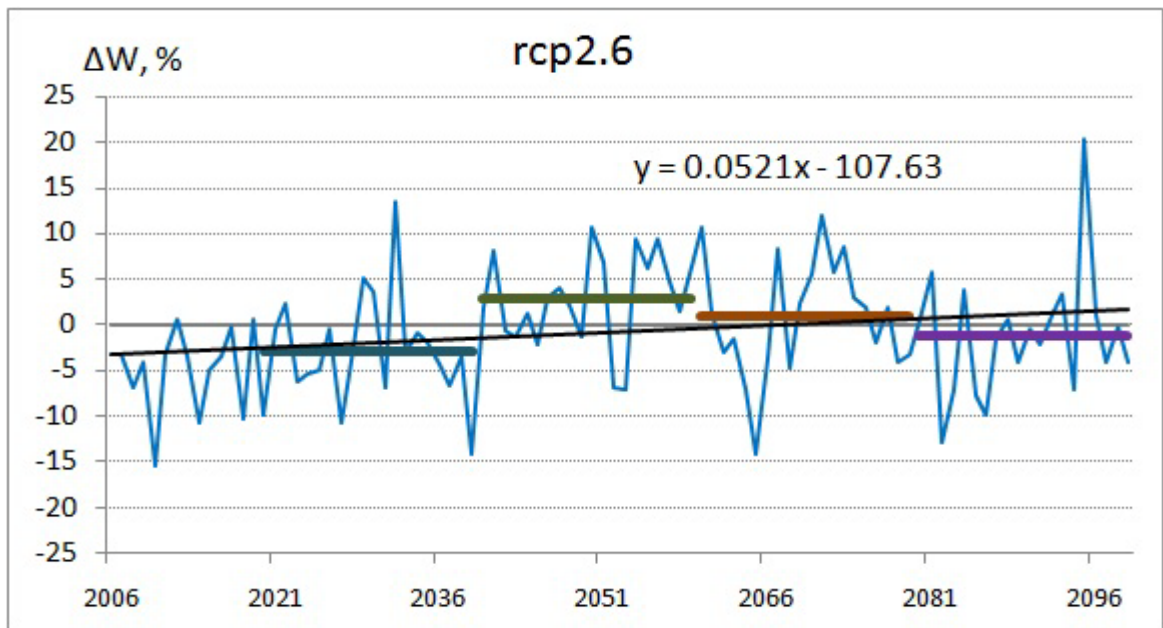


Рисунок 4.3.14 – Среднее по ансамблю GCMs изменение рассчитанного годового стока р. Амур в XXI веке для сценария rcp2.6 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

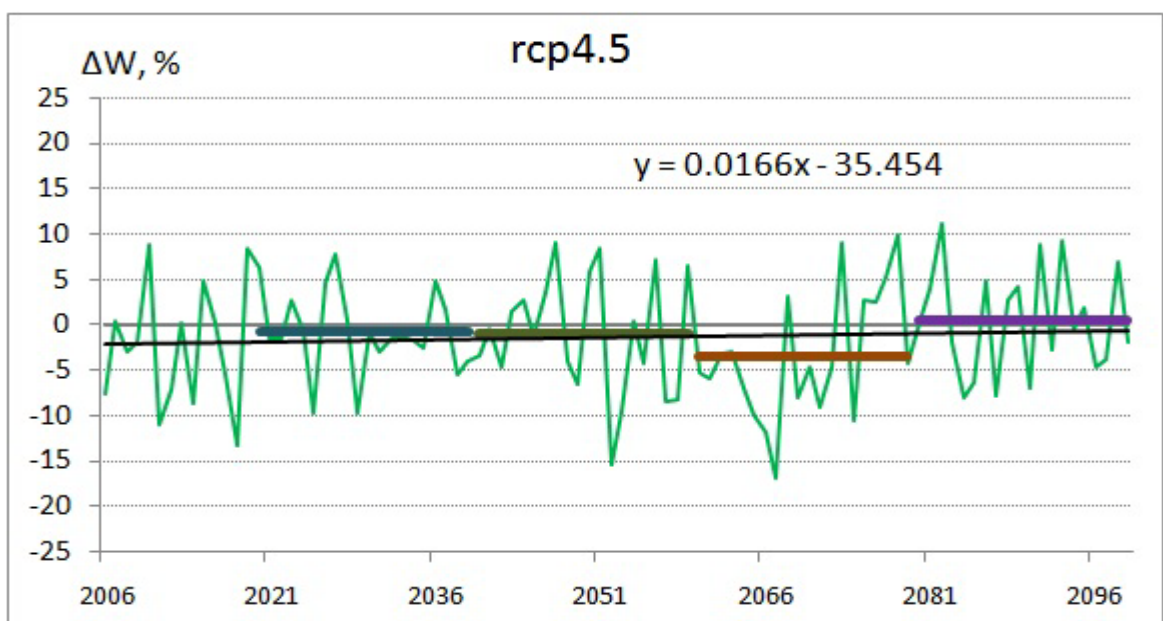


Рисунок 4.3.15 – Среднее по ансамблю GCMs изменение рассчитанного годового стока р. Амур в XXI веке для сценария rcp4.5 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)



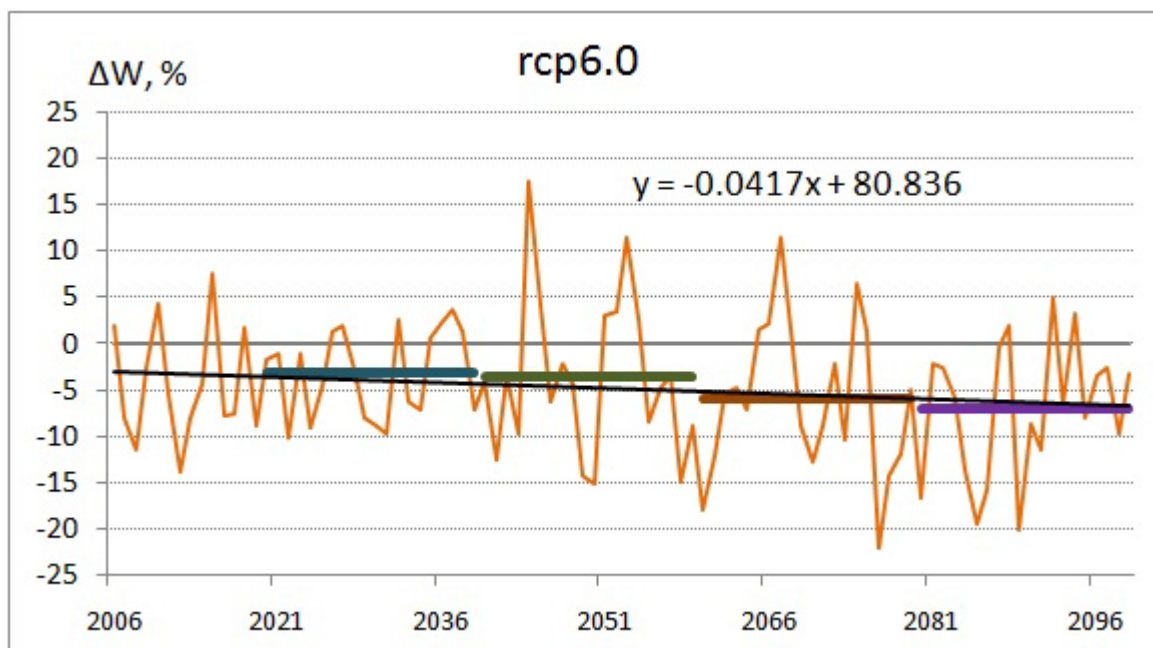


Рисунок 4.3.16 – Среднее по ансамблю GCMs изменение рассчитанного годового стока р. Амур в XXI веке для сценария rcp6.0 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

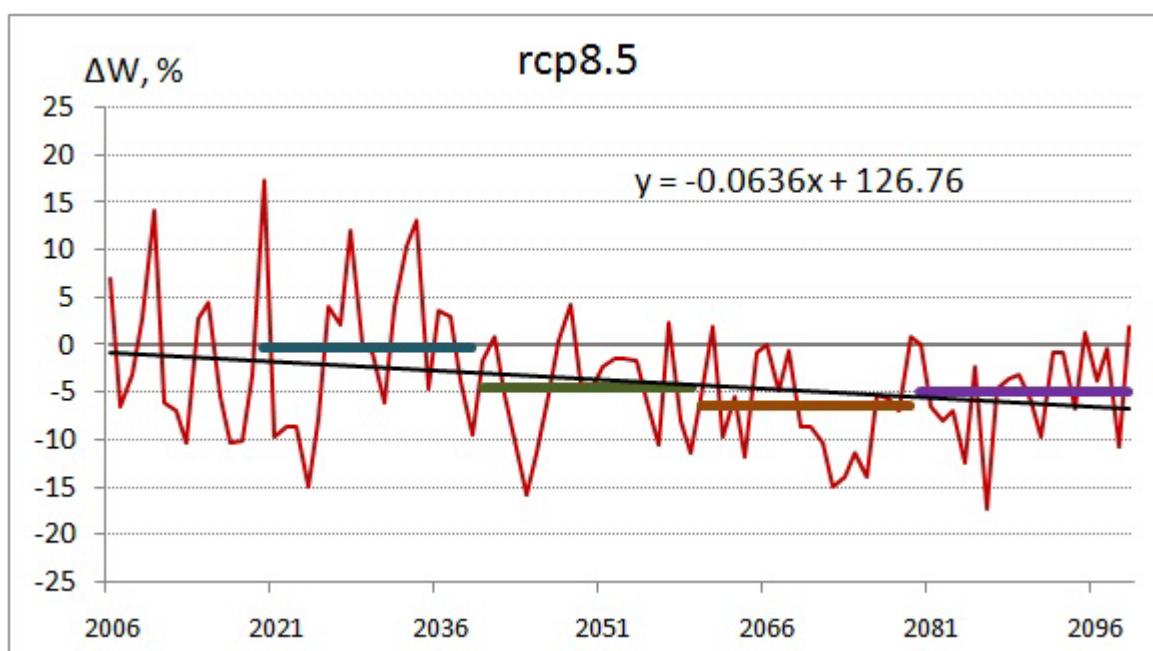


Рисунок 4.3.17 – Среднее по ансамблю GCMs изменение рассчитанного годового стока р. Амур в XXI веке для сценария rcp8.5 (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 20 лет)

Сравнивая рассчитанные характеристики стока за определенный период в будущем с рассчитанными за исторический период 1986-2005 гг., можно оценить влияние климатических изменений на среднемноголетний сток. При анализе динамики стока Амура, осредненного по двадцатилетним периодам, отмечено, что при сценарии rcp2.6 в период 2020-2039 гг. возможно сокращение стока, затем небольшое его увеличение с последующим уменьшением в конце XXI века (табл. 4.3.5, рисунок 4.3.18). При сценарии rcp4.5 вероятно постепенное сокращение стока



Амура с положительной тенденцией только за период 2080-2099 гг. При сценариях rcp6.0 и rcp8.5 возможно уменьшение водности р. Амур в течение всего столетия относительно базового периода 1986-2005 гг.

Таблица 4.3.5 – Изменение среднемноголетнего ансамблевого стока Амура (%), осредненного по периодам XXI века, при различных RCP-сценариях

сценарий период	rcp2.6	rcp4.5	rcp6.0	rcp8.5
2020-2039	-2.9	-0.7	-3.2	-0.2
2040-2059	2.8	-1.0	-3.5	-4.6
2060-2079	0.9	-3.6	-6.0	-6.3
2080-2099	-1.2	0.5	-7.0	-4.9

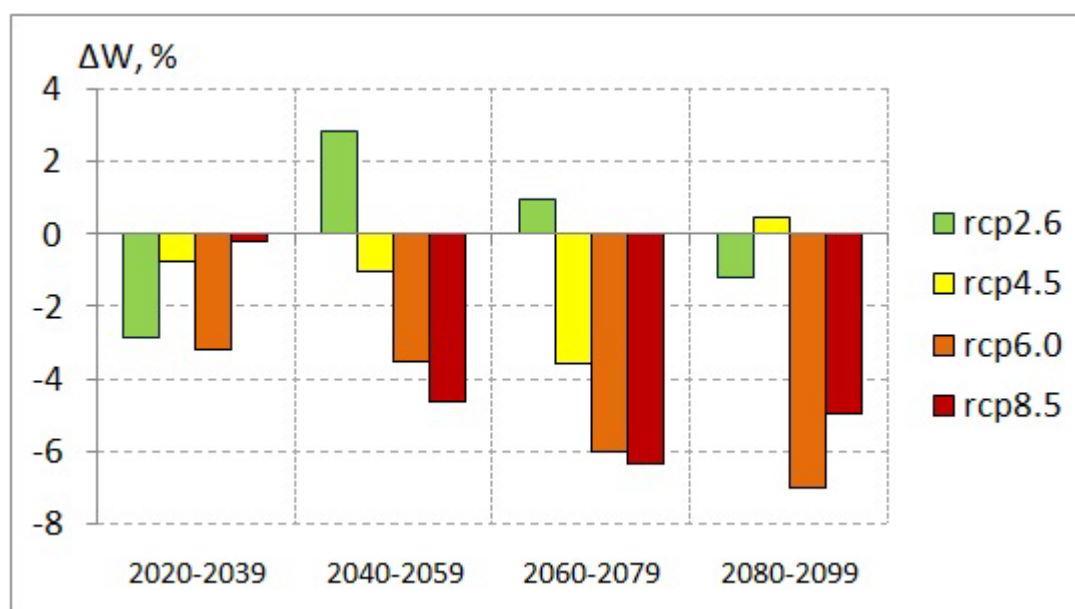


Рисунок 4.3.18 – Осредненное по 20-ти летним периодам среднее по ансамблю GCMs изменение стока р. Амур в XXI веке, рассчитанное при различных RCP-сценариях

Для уменьшения амплитуды ежегодных колебаний аномалий стока Амура были построены 30-летние скользящие средние проекций этих изменений (Рисунок 4.3.19). Положительная тенденция водности р. Амур отмечена только для второй половины XXI века при сценарии rcp2.6. При остальных трех сценариях радиационного воздействия возможно сокращение стока на протяжении всего столетия. При этом для умеренного сценария rcp4.5 характерно уменьшение водности Амура в пределах 4%, а при сценариях rcp6.0 и rcp8.5 траектории проекций аномалий годового стока в целом схожи в пределах –8%.

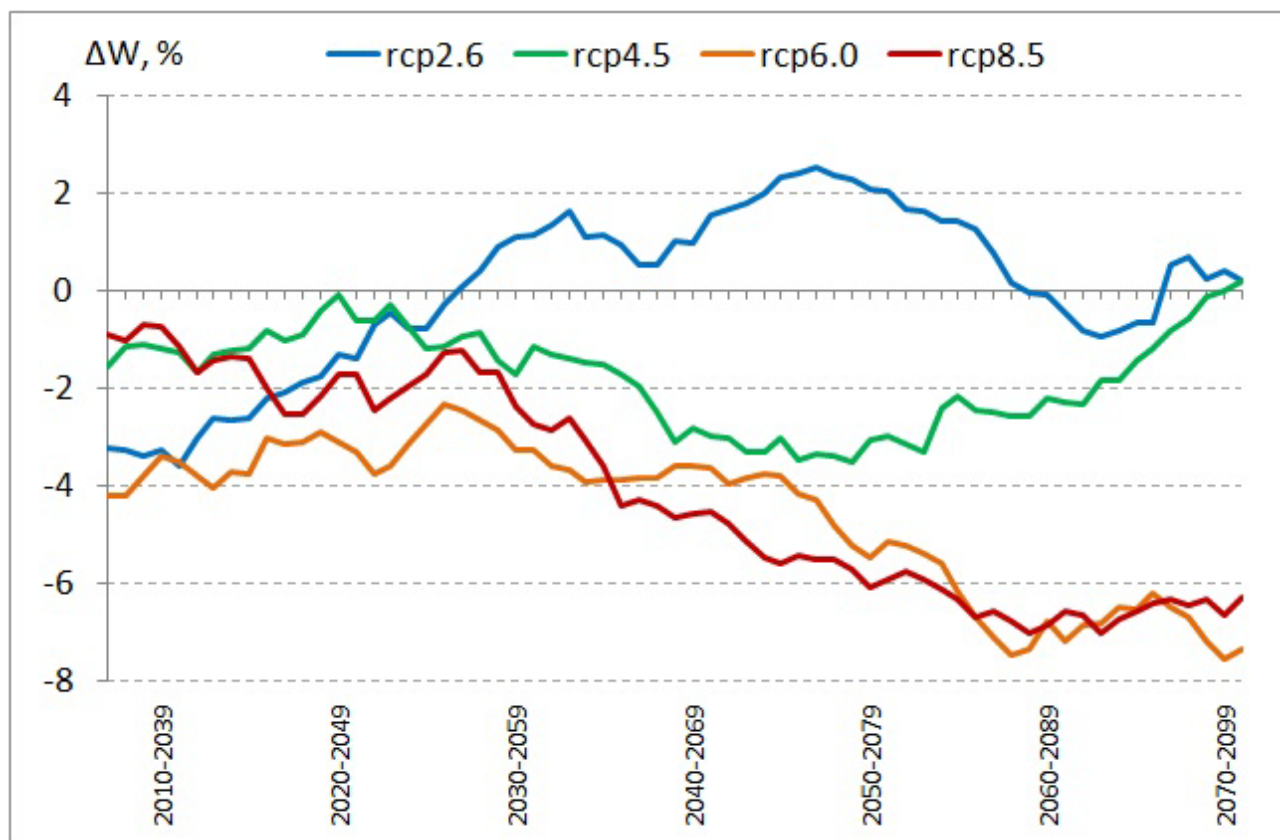


Рисунок 4.3.19 – 30-летние скользящие средние проекции изменений ансамблевого годового стока р. Амур в XXI веке при различных RCP-сценариях

Отличия между результатами моделирования климатической системы на разных моделях GCMs и, следовательно, соответствующего им гидрологического режима р. Амур неизбежны даже при использовании одинаковых сценариев радиационного воздействия. Такой эффект называется модельной неопределенностью оценок возможных изменений климата и стока в речном бассейне.

На рисунках 4.3.20–4.3.23 представлены средние значения изменения стока р. Амур по двадцатилетним периодам XXI века относительно исторического периода при различных моделях климата и сценариях антропогенного воздействия. Большинство климатических моделей показывают отрицательные аномалии стока р. Амур для всех RCP-сценариев, за исключением модели MRI-CGCM3.

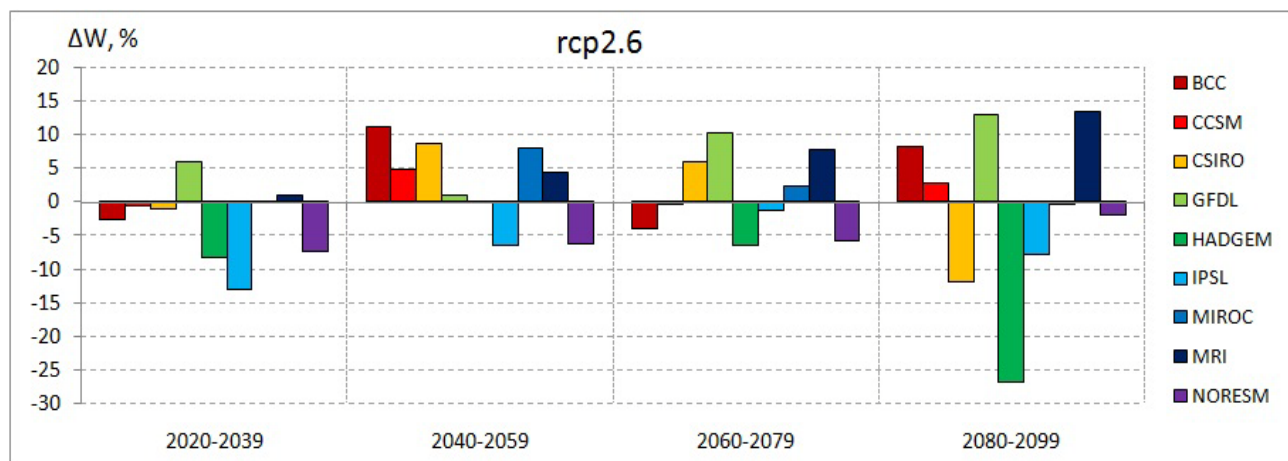


Рисунок 4.3.20 – Изменение годового стока р. Амур по периодам XXI века для различных моделей климата при сценарии rcp2.6

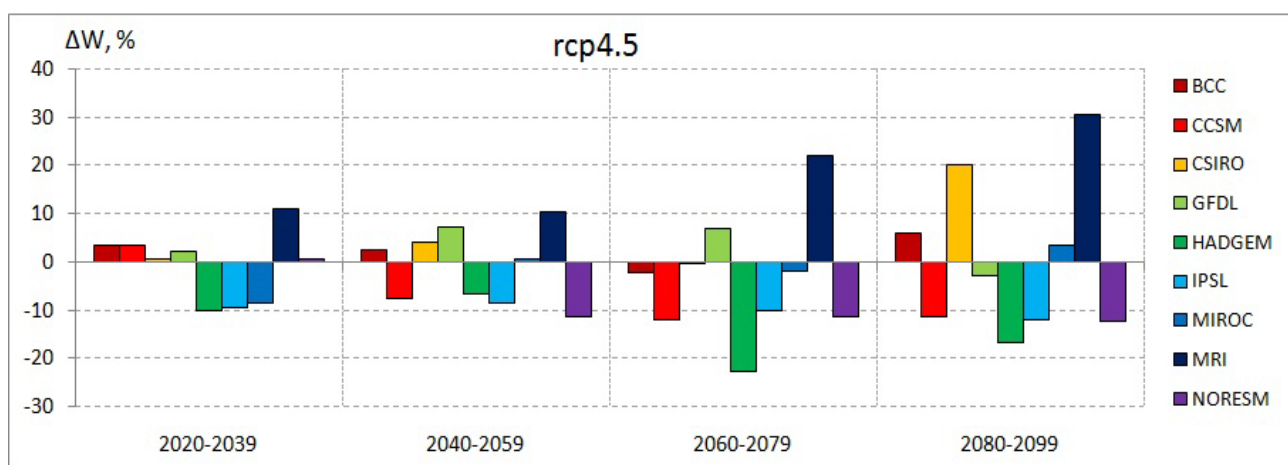


Рисунок 4.3.21 – Изменение годового стока р. Амур по периодам XXI века для различных моделей климата при сценарии rcp4.5

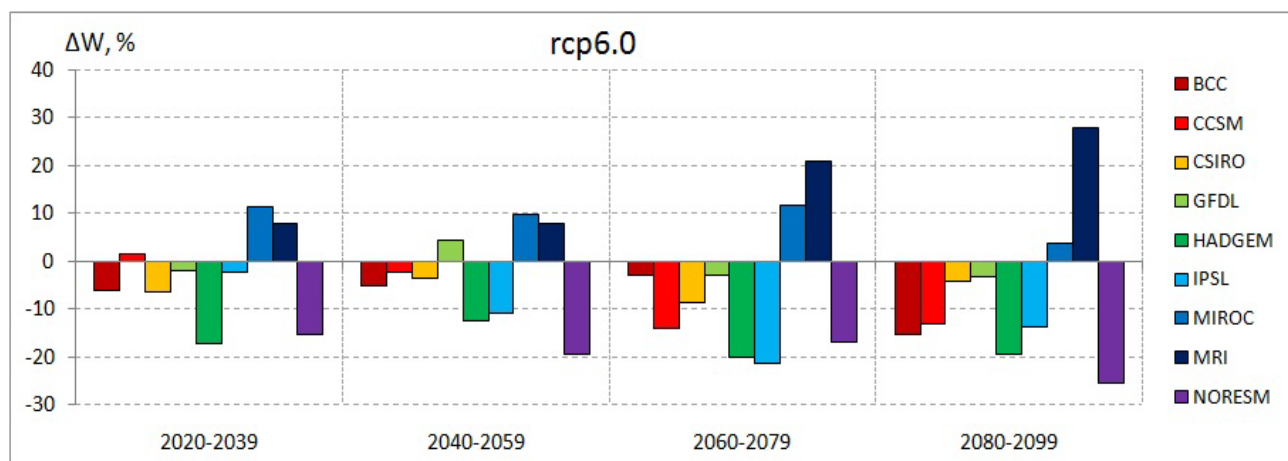


Рисунок 4.3.22 – Изменение годового стока р. Амур по периодам XXI века для различных моделей климата при сценарии rcp6.0

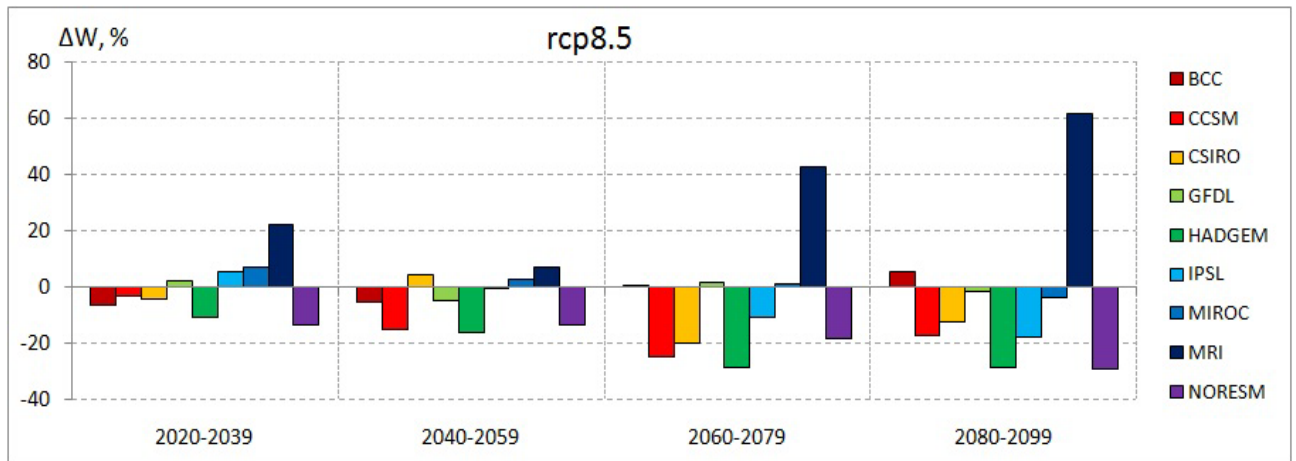


Рисунок 4.3.23 – Изменение годового стока р. Амур по периодам XXI века для различных моделей климата при сценарии rcp8.5

Анализируя вариации межгодовой изменчивости стока р. Амур, выраженной в виде коэффициента  $C_v$ , в пределах выделенных двадцатилетних периодов для различных сценариев антропогенного воздействия, следует отметить, что при сценарии rcp2.6 для периода 2040-2079 гг. возможно уменьшение  $C_v$  на 0.04, для сценария rcp6.0 наоборот увеличение на 0.03, для сценариев rcp4.5 и rcp8.5 изменчивость  $C_v$  слабо выражена (Рисунок 4.3.24).

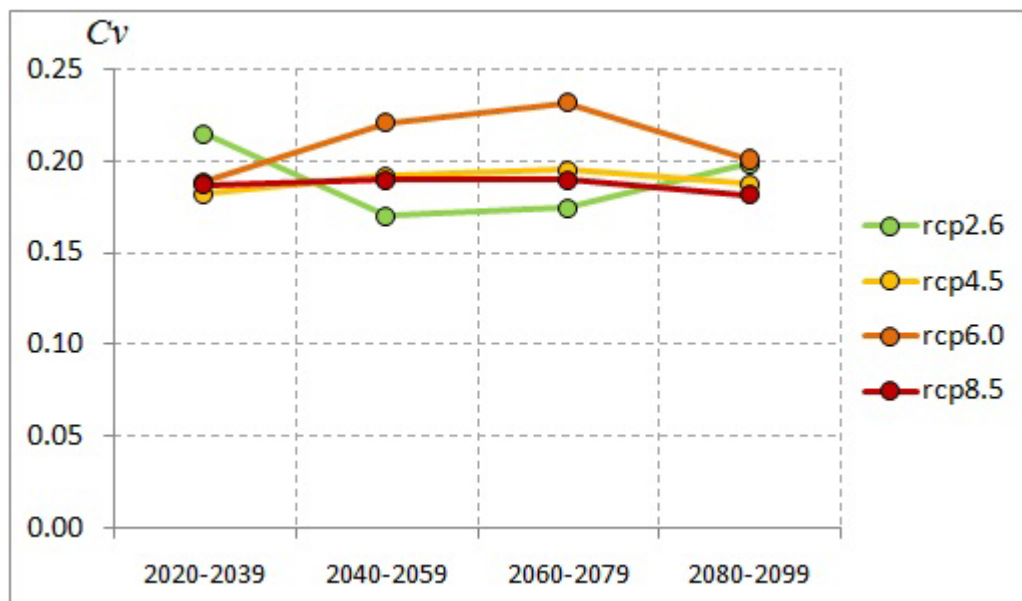


Рисунок 4.3.24 – Изменение коэффициента вариации объемов годового ансамблевого стока р. Амур по периодам XXI века при различных RCP-сценариях

Для выявления значимости климатически обусловленных изменений стока при будущих возможных условиях проведены расчеты критерия  $SNR$  для годового ансамблевого стока р. Амур по двадцатилетним периодам XXI века как с учетом различных RCP-сценариев в отдельности, так и всех вместе. Результаты расчетов представлены в таблице 4.3.6.

Таблица 4.3.6 – Критерий  $SNR$  для среднесноголетнего ансамблевого стока р. Амур по двадцатилетним периодам XXI века с учетом различных RCP-сценариев

сценарий период	rsp2.6	rsp4.5	rsp6.0	rsp8.5	все сценарии
2020-2039	0.26	0.05	0.30	0.04	0.16
2040-2059	0.36	0.04	0.25	0.44	0.13
2060-2079	0.14	0.25	0.44	0.54	0.37
2080-2099	0.04	0.16	0.57	0.38	0.26

Таким образом, по результатам проведенных численных экспериментов можно сделать вывод о том, что возможные изменения годового стока р. Амур в XXI веке оказываются меньше изменчивости оценок стока, связанной с неопределенностью выбора модели климата.

Для оценки климатически обусловленных изменений вероятностей наступления экстремально многоводных лет во времени в бассейне р. Амур были построены распределения нормированных по отношению к историческому периоду величин годового стока р. Амур за прогнозируемый период XXI века по ансамблю GCMs с учетом различных RCP-сценариев. Для этого набор нормированных величин годового стока по девяти климатическим моделям рассматривался как единая выборка из 180 элементов (9 моделей \* 20 лет). На рисунках 4.3.25–4.3.28 представлены распределения нормированных величин объемов ансамблевого годового стока р. Амур с учетом различных RCP-сценариев за периоды 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079, 2080-2099 гг. и базового исторического расчета за 1986-2005 гг.

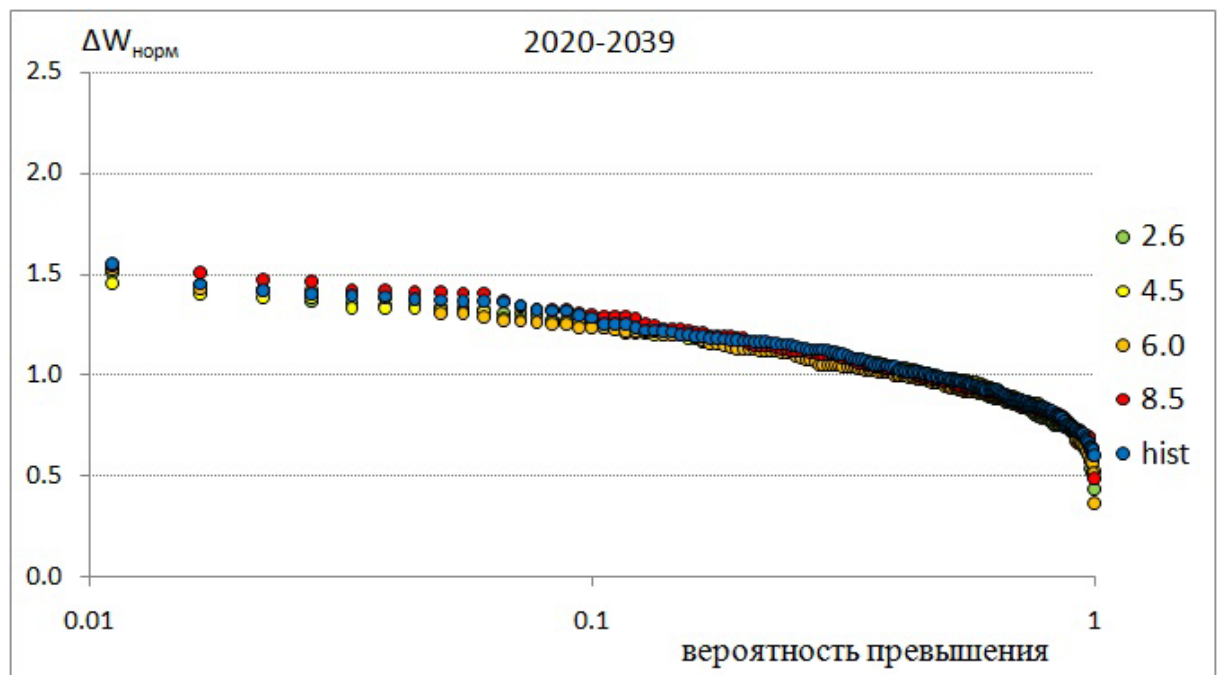


Рисунок 4.3.25 – Распределение нормированных величин объемов ансамблевого годового стока р. Амур при различных RCP-сценариях за период 2020-2039 гг.

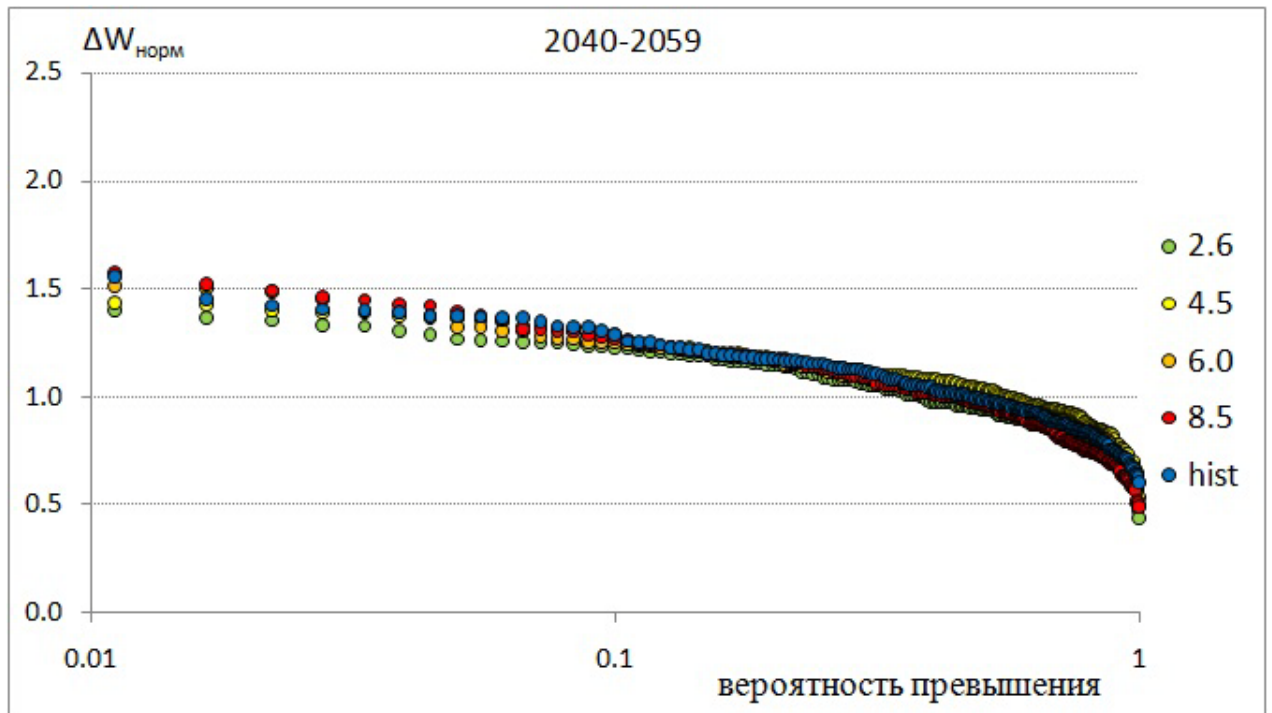


Рисунок 4.3.26 – Распределение нормированных величин объемов ансамблевого годового стока р. Амур при различных RCP-сценариях за период 2040-2059 гг.

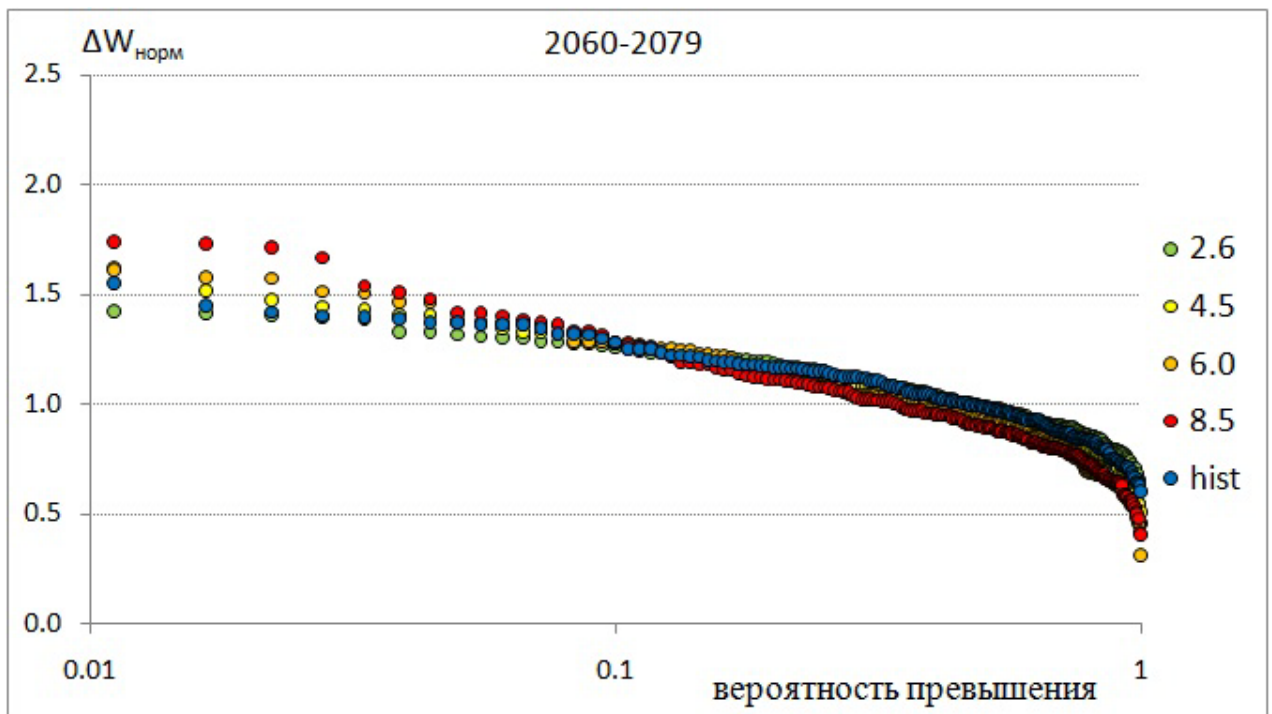


Рисунок 4.3.27 – Распределение нормированных величин объемов ансамблевого годового стока р. Амур при различных RCP-сценариях за период 2060-2079 гг.



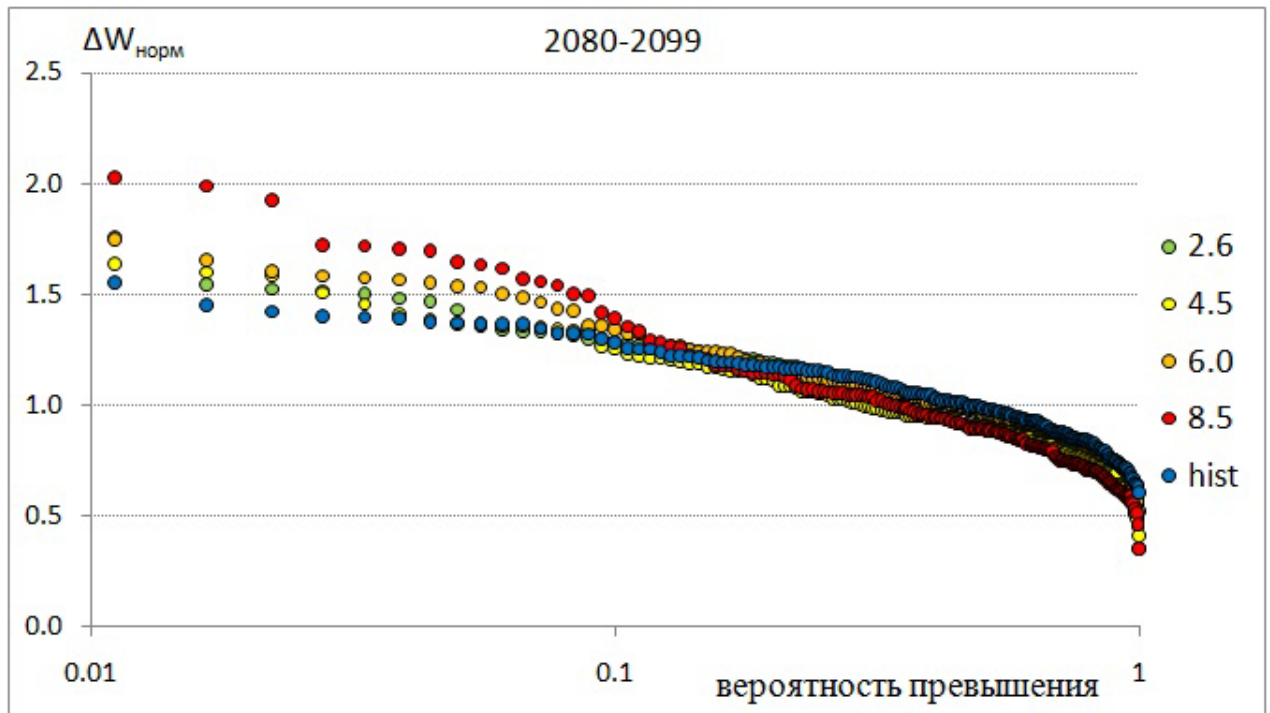


Рисунок 4.3.28 – Распределение нормированных величин объемов ансамблевого годового стока р. Амур при различных RCP-сценариях за период 2080-2099 гг.

Для периодов 2020-2039 и 2040-2059 гг. значительных различий в распределении вероятности многоводных лет, как между сценариями антропогенного воздействия, так и относительно исторического периода не отмечено. Причем для сценариев гср2.6 и гср4.5 за период 2040-2059 гг. вероятно снижение объемов годового стока р. Амур в области выше 10% обеспеченности относительно исторического периода. За период 2060-2079 гг. вероятно увеличение годового стока в области выше 5% обеспеченности при сценариях гср4.5, гср6.0, гср8.5. В этот период для наиболее жесткого сценария в области высоких повторяемостей характерно увеличение объема максимального годового стока на 20-30% относительно исторического периода.

Для периода 2080-2099 гг. возможно увеличение объемов годового стока р. Амур в области выше 10% обеспеченности относительно исторического периода. При этом, например, из рисунка 4.3.28 видно, что к концу XXI века при сценарии гср8.5 вероятность наиболее многоводного за период наблюдений года увеличится почти на порядок по сравнению с наиболее мягким сценарием гср2.6: с примерно 1% до 10%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационного исследования перечислены ниже.

1. Впервые разработана физико-математическая региональная модель формирования речного стока для всего бассейна р. Амур. Модель позволяет рассчитать среднесуточные расходы воды в основном русле и на притоках за многолетний период, смоделировать с суточным разрешением пространственное распределение характеристик снежного покрова, влажности почвы, испарения и других характеристик водного режима бассейна в целом и частных водосборов по стандартным данным метеорологического и водохозяйственного мониторинга. Впервые были апробированы методы определения параметров применяемой модели формирования стока на основе глобальных баз данных о характеристиках почв и ландшафтов. Проведена калибровка параметров модели и верификация на независимом материале.
2. Разработанная модель формирования речного стока позволила с удовлетворительной точностью воспроизвести наблюдаемые гидрографы суточного стока на 15 гидрологических постах (из них 6 на основном русле р. Амур и 9 на притоках) по стандартным данным метеорологических наблюдений и водохозяйственного мониторинга за 20 лет (1994–2013 гг.). Впервые показаны возможности региональной гидрологической модели в бассейне р. Амур для анализа условий формирования экстраординарного паводка 2013 г.
3. На основе разработанных модели формирования стока и одномерной гидродинамической модели движения воды в русле создана методика анализа противопаводкового эффекта действующих (Зейского, Бурейского), проектируемых (Селемджинского, Нижне-Зейского) и строящегося (Нижне-Бурейского) водохранилищ на Среднем Амуре. Методика апробирована для разных сценариев гидрометеорологических условий в речном бассейне, включая условия формирования паводка 2013 г. На основании проведенных численных экспериментов:
  - показано, что регулирование стока действующими водохранилищами в период прохождения паводка 2013 г. позволило снизить уровни воды р. Амур на 1.7–2.1 м, а также более чем в 2 раза сократить время стояния воды выше отметок, при которых вероятно затопление населенных территорий;
  - получена зависимость срезки максимального уровня воды на участке р. Амур ниже впадения р. Зеи от величины суммарной противопаводковой емкости Нижне-Зейского и Селемджинского водохранилищ. Строительство проектируемых водохранилищ позволило бы дополнительно снизить максимальные уровни р. Амур на 0.3–1.3 м в зависимости от поставленных требований снижения уровней воды.

4. Исследованы возможности региональной модели формирования стока для оценки многолетних характеристик водного режима р. Амур за период наблюдений с использованием в качестве входных данных результатов ансамблевых расчетов глобальных климатических моделей. Разработаны методы и получены результаты оценки с помощью гидрологической модели бассейна р. Амур возможных изменений многолетних характеристик водного режима в XXI веке с использованием ансамблей климатических проекций, рассчитанных по глобальным моделям климата при разных сценариях радиационного воздействия. Проведена оценка значимости климатически обусловленных изменений стока р. Амур при прогнозируемых условиях в XXI веке. Показано, что полученные в результате экспериментов изменения годового стока р. Амур в XXI веке оказываются меньше изменчивости оценок стока, связанной с неопределенностью выбора модели климата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов В.В., Глотко А.В., Белоусова И.В., Завадский А.С. Применение численного гидродинамического моделирования для решения проблем пограничных водных объектов Сибири // Труды Всероссийской научной конференции «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», Барнаул, 2012. Т.1. С. 7-15.
2. Березников К.П. Тепловлагообмен и вопросы орошения и осушения сельскохозяйственных культур на юге Дальнего Востока // Труды ДВНИГМИ. Вып.72. 1978. 130 с.
3. Болгов М.В., Алексеевский Н.И., Гарцман Б.И., Георгиевский В.Ю., Дугина И.О., Ким В.И., Махинов А.Н., Шалыгин А.Л. Экстремальное наводнение в бассейне Амура в 2013 году: анализ формирования, оценки и рекомендации // География и природные ресурсы. №3. 2015. С. 17-26.
4. Болгов М.В., Попова Н.О., Филимонова М.К. Метод композиции распределений для оценки максимальных расходов воды р. Амур с учетом эффекта регулирования стока // Водные ресурсы. Т.43. №3. 2016. С. 265-276.
5. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик в бассейне Амура // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. Т.1. С. 87-93.
6. Борщ С.В., Бураков Д.А., Симонов Ю.А. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды ГУ ГМЦ РФ. Вып.359. 2016. С. 106-127.
7. Бугаец А.Н. Кандидатская диссертация. Разработка методов определения структурно-гидрографических характеристик по данным ЦМР для гидрологического моделирования, 2011. 215 с.
8. Бугаец А.Н. Применение стандарта OpenMI для создания интегрированных систем гидрологического моделирования // Метеорология и гидрология. №7. 2014. С. 93-105.
9. Бугаец А.Н., Мотовилов Ю.Г., Беликов В.В., Гельфан А.Н., Гончуков Л.В., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Морейдо В.М., Норин С.В., Румянцев А.Б., Сазонов А.А. Построение интегрированной системы гидрологического моделирования с применением стандарта OpenMI для задач управления риском наводнений (на примере Среднего Амура) // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на

- период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. Т.2. С. 12-20.
10. Бураков Д.А., Мельникова О.В. Аппроксимация кривых добегания при отрицательной асимметрии с использованием зеркального преобразования гамма-распределения // Метеорология и гидрология. №2. 2000. С. 75–87.
  11. Водные ресурсы России и их использование // Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
  12. Возняк А.А. Анализ и расчет температуры воздуха в бассейнах рек Среднего Амура для задач гидрологического моделирования // Труды ДВНИГМИ. №151. 2002. С. 93-101.
  13. Возняк А.А. Кандидатская диссертация. Моделирование поступления тало-дождевых вод на поверхность водосборов Приамурья, 2004. 211 с.
  14. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации // Росгидромет, 2014. 1009 с.
  15. Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.
  16. Гарцман Б.И., Галанин А.А. Структурно-гидрографический и морфометрический анализ речных систем: теоретические аспекты // География и природные ресурсы. №3. 2011. С. 27-37.
  17. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 294 с.
  18. Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // Пленарные доклады VII Всероссийского гидрологического съезда, 2014. С. 79-102.
  19. Гидроэкологический мониторинг зоны влияния Зейского гидроузла. Хабаровск: ДВО РАН, 2010. 354 с.
  20. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 427 с.
  21. Говорушко С.М, Горбатенко Л.В. Трансграничное водопользование в бассейне р. Амур // Вестник ДВО РАН. №2. 2013. С. 74-83.
  22. Губарева Т.С. Кандидатская диссертация. Максимальный сток рек в бассейне Амура: закономерности формирования и методы расчетов, 2004. 143 с.
  23. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия

- формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т.41. №2. С. 111-122.
24. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Моделирование формирования катастрофического наводнения 2013 г. в бассейне Амура // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. М.: Росгидромет, 2014. С. 121–147.
  25. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.:ГЕОС, 2011. 660 с.
  26. Добровольский С.Г. Оценка неопределенностей прогноза стока рек России и мира в XXI веке с учетом возможного антропогенного потепления // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. Т.1. С. 142-148.
  27. Дугина И.О., Гаврилов А.В. Эскизный проект восстановления, модернизации и развития гидрометеорологической сети наблюдений и системы гидрологического прогнозирования в бассейне р. Амур // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. М.: Росгидромет, 2014. С. 173-202.
  28. Дугина И.О., Явкина Е.Н., Агеева С.А., Большепалова О.В., Дунаева И.М., Ефремова Н.Ф., Сальников В.И., Крамарева Л.С., Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Выдающееся наводнение на р. Амур в 2013 году и его особенности // Пленарные доклады VII Всероссийского гидрологического съезда, 2014. С. 58-78.
  29. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.19,20,21.
  30. Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. Л., Гидрометеиздат, 1954. 133 с.
  31. Информационный бюллетень о состоянии поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории зоны деятельности Амурского БВУ за 2010 год. Хабаровск: Амурское бассейновое водное управление, 2011. 343 с.
  32. Калугин А.С. Разработка модели формирования стока реки Амур на базе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG // Сборник трудов Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. Т.1. С. 149-155.
  33. Калугин А.С. Моделирование катастрофического наводнения 2013 года в бассейне р. Амур // Сборник тезисов международной конференции «Вторые Виноградовские чтения. Искусство гидрологии». СПб., 2015. С. 238-241.



34. Калугин А.С. Оценка влияния возможных изменений климата на сток р. Амур на основе ретроспективных данных // Сборник трудов IX международной научной конференции молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность». М., 2015. С. 46-49.
35. Калугин А.С., Крыленко И.Н. Математическое моделирование движения паводочной волны при использовании исходной информации различной детальности // Водное хозяйство России. №3. 2014. С. 38-57.
36. Катастрофическое наводнение 2013 года в Дальневосточном федеральном округе. Том I. Уроки и выводы: Научно-методический труд // МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. 154 с.
37. Катцов В.М., Акентьева Е.М., Говоркова В.А., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Спорышев П.В., Хлебникова Е.И., Школьник И.М. Экстремальные паводки и оценки их рисков в бассейне Амура в контексте региональных изменений климата: об инструментах, методах и подходах необходимых исследований // Сборник докладов «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации». М.: Росгидромет, 2014. С. 67-80.
38. Катцов В.М., Говоркова В.А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Труды ГГО. Вып.569. 2013. С. 75-97.
39. Ким В.И. Влияние антропогенных факторов на гидрологический режим реки Амур // Факторы формирования качества воды на нижнем Амуре / под ред. Л.М. Кондратьевой. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 80-100.
40. Ким В.И., Махинов А.Н. Прохождение паводочной волны и водный режим в нижнем течении р. Амур // Материалы конференции по проблемам водных ресурсов Дальневосточного экономического района и Забайкалья. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 513-519.
41. Крыжов В.Н., Вильфанд Р.М. Макрометеорологические условия формирования сильных осадков в бассейне р. Амур в июне – сентябре 2013 г. и успешность их прогнозирования // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. М.: Росгидромет, 2014. С. 40-53.
42. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.: Наука, 1983. 216 с.
43. Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А. Чувствительность гидрологических систем. М.: Наука, 1990. 143 с.

44. Макагонова М.А. Кандидатская диссертация. Влагооборот в малых речных бассейнах юга Дальнего Востока: региональная оценка на основе динамического моделирования, 2009. 182 с.
45. Махинов А.Н. Современное рельефообразование в условиях аллювиальной аккумуляции. Владивосток: Дальнаука, 2006. 232 с.
46. Махинов А.Н. Изменение гидрологического режима реки Амур и его экологические последствия // Материалы конференции «Состояние и перспективы российско-китайского сотрудничества в области охраны окружающей среды и управления водными ресурсами». М.: Мин-во природных ресурсов, 2007. С. 56-62.
47. Махинов А.Н., Ким В.И. Воронов Б.А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. №2. 2014. С. 5-14.
48. Мещенина Л.А., Новороцкий П.В., Пономарев В.И. Климатические изменения и колебания стока Амура // Вестник ДВО РАН. №4. 2007. С. 44-54.
49. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.19. Бассейны Амура (без бассейнов Шилки, Аргуни, Уссури, Амазара) и Уды. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 411 с.
50. Мотовилов Ю.Г., Данилов-Данильян В.И., Дод Е.В., Калугин А.С. Оценка противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура на основе физико-математических гидрологических моделей // Водные ресурсы. Т.42. №5. 2015. С. 476-491.
51. Мотовилов Ю.Г., Дмитриев Е.С., Беднарук С.Е., Герасимов С.В., Егоров В.М. Автоматизированная информационно-управляющая система (АИУС) «Водные ресурсы» // Сборник «Водные ресурсы. Проблемы и пути их решения». Йошкар-Ола, 2003. С. 17-40.
52. Мохов И.И. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне реки Амур в условиях глобального потепления // Доклады Академии наук. Т.455. №5. 2014. С. 585-588.
53. Мохов И.И., Хон В.Ч., Тимажев А.В., Чернокульский А.В., Семенов В.А. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне р. Амур в связи с климатическими изменениями // Сборник докладов «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации». М.: Росгидромет, 2014. С. 81-120.
54. Новороцкий П.В. Распространение муссона над южной частью российского Дальнего Востока // Метеорология и гидрология. №11. 1999. С. 40-46.

55. Новороцкий П.В. Климатические изменения в бассейне Амура за последние 115 лет // Метеорология и гидрология. №2. 2007. С. 43-53.
56. Новороцкий П.В. Многолетние флуктуации стока р. Сунгари // Изв. Иркут. ун-та. Сер. Науки о Земле. Т.1. №1. 2009. С. 113-126.
57. Основные положения «Программы строительства новых гидроэнергетических объектов на притоках реки Амур в целях регулирования водосбора в паводковые периоды». Ленгидропроект, 1979. 193 с.
58. Основные правила использования водных ресурсов Зейского водохранилища на р. Зее. М., 1984. 22 с.
59. Павлова Т.В., Катцов В.М., Мелешко В.П., Школьник И.М., Говоркова В.А., Надежина Е.Д. Новое поколение климатических моделей // Труды ГГО. Вып.575. 2014. С. 5-64.
60. Порфирьев Б.Н. Экономические последствия катастрофического наводнения на Дальнем Востоке в 2013 году // Вестник Российской академии наук. Т.85. №2. 2015. С. 128-137.
61. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.18, вып.2 // Под ред. А.А. Муранова. Л., 1970.
62. Свидетельство о гос. рег. в Роспатенте. Модель ЕСОМАГ. № 2013610703. 09.01.2013
63. Сводный том СКИОВО бассейна р. Амур. Амурское БУ, 2013.
64. Семенов В.А. Климатически обусловленные изменения опасных и неблагоприятных гидрологических явлений на реках России // Метеорология и гидрология. №2. 2011. С. 74-82.
65. Семенов Е.К., Соколина Н.Н., Татаринович Е.В., Тудрий К.О. Синоптические условия формирования катастрофического наводнения на Амуре в 2013 г. // Метеорология и гидрология. №8. 2014. С. 25-34.
66. Симонов Е.А. Китайская водная политика и паводки 1998-2013 гг. [http://www.eecca-water.net/file/china\\_and\\_flood\\_2013.pdf](http://www.eecca-water.net/file/china_and_flood_2013.pdf)
67. Соколова В.В. Кандидатская диссертация. Пространственно-временная изменчивость стока рек бассейна Амура, 2013. 147 с.
68. Соколова Г.В. Анализ водного режима Амура за период до катастрофического наводнения в 2013 г. // Метеорология и гидрология. №7. 2015. С. 66-69.
69. Соловьев И.А. Русловой процесс и водные пути Амурского лимана. Владивосток: Приморский сельскохозяйственный институт, 1974. 290 с.
70. Соловьев И.А. Амуролиманский русловой процесс и водные пути. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 1995. 270 с.

71. Спорышев П.В., Катцов В.М., Матюгин В.А. Согласованность температурных изменений на территории России в ансамблевых модельных расчетах и данных наблюдений // Метеорология и гидрология. №1. 2012. С. 5-19.
72. Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г. Воздействие гидротехнического строительства на сток Амура // Метеорология и гидрология. №5. 2006. С. 86-95.
73. Энциклопедии «Реки и озера мира». М.: ООО «Издательство Энциклопедия», 2012. 928 с.
74. Фалько В.В. Кандидатская диссертация. Моделирование гидрографа летне-осеннего стока с учетом водоохранной роли леса для малых водосборов Приморья, 2002. 213 с.
75. Фролов А.В., Асмус В.В., Борщ С.В., Вильфанд Р.М., Жабина И.И., Затягалова В.В., Кровотынцев В.А., Кудрявцева О.И., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А., Степанов Ю.А. ГИС Амур: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. №3. 2016. С. 5-21.
76. Фролов А.В., Георгиевский В.Ю. Экстремальный паводок 2013 г. в бассейне р. Амур // Сборник докладов «Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации». М.: Росгидромет, 2014. С. 5-39.
77. Хон В.Ч., Мохов И.И. Гидрологический режим бассейнов крупнейших рек Северной Евразии в XX-XXI вв. // Водные ресурсы. Т.39. №1. 2012. С. 1-10.
78. Шалыгин А.Л. Факторы формирования Амурских наводнений на основе пространственного анализа вероятностных характеристик выдающихся паводков в бассейне Амура // Труды Четвертой Всероссийской научной конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов». М.: ИВП РАН, 2015. С. 349-351.
79. Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Макагонова М.А. Исследования гидрологических последствий современных изменений климата в дальневосточном регионе России // Вестник ДВО РАН. №2. 2014. С. 15-23.
80. Allen R.J., Landuyt W., Rumbold S.T. An increase in aerosol burden and radiative effects in a warmer world // Nature Climate Change. V.6. 2015. P. 269-274.
81. Anagnostopoulos G.G., Koutsoyiannis D., Christofides A., Efstratiadis A., Mamassis N. A comparison of local and aggregated climate model outputs with observed data // Hydrolog. Sci. J. V.55. 2010. P. 1094-1110.
82. Bastet G., Bruand A., Voltz M. Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of French soils // Proc. of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Riverside, California, USA, 1999. P. 981-991.

83. Bates B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu S., Palutikof J.P. (eds): Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 2008.
84. Belikov V.V., Semenov A.Y. A Godunov's type method based on an exact solution to the riemann problem for the shallow-water equations // Proc. 4 Eur. Comp. Fluid Dyn. Conf. (ECCOMAS 98). WILEY, New York, 1998. V.1. Part 1. P. 310-315.
85. Bentsen M., Bethke I., Debernard J. B., Iversen T., Kirkevåg A., Seland Ø., Drange H., Roelandt C., Seierstad I.A., Hoose C., Kristjánsson J. E. The Norwegian Earth system model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate // Geosci. Model Dev. V.6. 2013. P. 687-720.
86. Blöschl G., Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling: a review // Hydrol. Process. V.9. 1995. P. 251-290.
87. Bruyere L., Done J.M., Holland G.J., Sherrie F. Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather Cindy // Clim. Dyn. V.43. 2014. P. 1847–1856.
88. Chiew F.H.S., Teng J., Vaze J., Post D.A., Perraud J.M., Kirono D.G.C., Viney N.R. Estimating climate change impact on runoff across out heast Australia: Method, results, and implications of the modelling method // Water Resour. Res. V.45. W10414, 2009.
89. Climate Change. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2007. 18 p.
90. Cosby B.J., Hornberger G.M., Clapp R.B., Ginn T.R. A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils // Water Resour. Res. V.20. 1984. P. 682-690.
91. Dobrovolski S.G. Assessment of the statistical significance of global changes in the annual river runoff in XXI century due to possible anthropogenic warming of climate // Water Resources. V.41. №6. 2014. P. 728-737.
92. Driessen T.L.A., Hurkmans R.T., Terink W., Hazenberg P., Torfs P.J., Uijlenhoet R. The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modeled by the HBV model // Hydrol. Earth Syst. Sci. V.14. 2010. P. 651-665.
93. Dufresne J.-L., Foujols M.-A., Denvil S., Caubel A., Marti O., Aumont O., Balkanski Y., Bekki S., Bellenger H., Benshila R., Bony S., Bopp L., Braconnot P., Brockmann P., Cadule P., Cheruy F., Codron F., Cozic A., Cugnet D., de Noblet N., Duvel J.-P., Ethe C., Fairhead L., Fichefet T., Flavoni S., Friedlingstein P., Grandpeix J.-Y., Guez L., Guilyardi E., Hauglustaine D., Hourdin F., Idelkadi A., Ghattas J., Joussaume S., Kageyama M., Krinner

- G., Labetoulle S., Lahellec A., Lefebvre M.-P., Lefevre F., Levy C., Li Z.X., Lloyd J., Lott F., Madec G., Mancip M., Marchand M., Masson S., Meurdesoif Y., Mignot J., Musat I., Parouty S., Polcher J., Rio C., Schulz M., Swingedouw D., Szopa S., Talandier C., Terray P., Viovy N., Vuichard N. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5 // *Clim. Dyn.* V.40. 2013. P. 2123-2165.
94. Dunne J., John J., Adcroft J., Griffies S., Hallberg R., Shevliakova E., Stouffer R., Cooke W., Dunne K., Harrison M., Krasting J., Malyshev S., Milly P., Philipps P., Sentman L., Samuels B., Spelman M., Winton M., Wittenberg A., Zadeh N. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics // *J. of Climate*. V.25. 2012. P. 6646-6665.
  95. FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2012. 43 p.
  96. Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconnot P., Chou S.C., Collins W., Cox P., Driouech F., Emori S., Eyring V., Forest C., Gleckler P., Guilyardi E., Jakob C., Kattsov V., Reason C., Rummukainen M. Evaluation of Climate Models, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 2013.
  97. Gartsman B.I. Chapter 3. Flood Cycle Model - new approach for extraordinary floods prediction // *Horizons in Earth Science Research*. V.9 / eds Veress B.J., Szigethy N.Y.: Nova Science Publishers Inc., 2013. P. 105-136.
  98. Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I., Moreido V., Zakharova E. Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions // *Hydrol. Sci. J.* V.60(7-8). 2015. P. 1266-1285.
  99. 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.
  100. Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Y., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues // *Climatic change. Special Issue*. 2016. doi:10.1007/s10584-016-1710-5
  101. Gent P.R., Danabasoglu G., Donner L.J., Holland M.M., Hunke E.C., Jayne S.R., Lawrence D.M., Neale R.B., Rasch P.J., Vertenstein M., Worley P.H., Yang Z.L., Zhang M. The Community Climate System Model Version 4 // *J. Climate*. V.24(19). 2011. P. 4973-4991.



102. Hall D.G., Reeve M.J., Thomasson A.J., Wright V.F. Water retention, porosity and density of field soils. Techn. Monogr. V.9. Soil Survey of England and Wales. 1977.
103. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1535 p.
104. Jeffrey S.J., Rotstayn L.D., Collier M.A., Dravitzki S.M., Hamalainen C., Moeseneder C., Wong K.K., J.I. Syktus. Australia's CMIP5 submission using the CSIRO Mk3.6 model // Australian Meteorological and Oceanographic Journal. V.63. 2013. P. 1-13.
105. Jones C.D., Hughes J.K., Bellouin N., Hardiman S.C., Jones G.S., Knight J., Liddicoat S., O'Connor F.M., Andres R.J., Bell C., Boo K.-O., Bozzo A., Butchart N., Cadule P., Corbin K.D., Doutriaux-Boucher M., Friedlingstein P., Gornall J., Gray L., Halloran P.R., Hurtt G., Ingram W.J., Lamarque J.-F., Law R.M., Meinshausen M., Osprey S., Palin E.J., Parsons L., Raddatz T., Sanderson M.G., Sellar A.A., Schurer A., Valdes P., Wood N., Woodward S., Yoshioka M., Zerroukat M. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations // Geosci. Model Dev. V.4. 2011. P. 543-570.
106. Knutti R. The end of model democracy? An editorial comment // Climate Change. V.102. 2010. P. 395-404.
107. Knutti R., Furrer R., Tebaldi C., Germak J., Meehl G.A. Challenges in combining projections from Multiple Climate Models // J. Climate. V.23. 2010. P. 2739-2758.
108. Kundzewicz Z.W., Mata L.J., Arnell N.W., Döll P., Jimenez B., Miller K., Oki T., Sen Z., Shiklomanov I. The implications of projected climate change for fresh water resources and their management // Hydrolog. Sci. J. V.53. 2008. P. 3-10.
109. Kundzewicz Z.W., Stakhiv E.Z. Are climate models «ready for prime time» in water resources management applications, or is more research needed? // Hydrological Sciences Journal. V.55(7). 2010. P. 1085-1089.
110. Lau W.K.M., Kyu-Myong K. The 2010 Pakistan Flood and Russian Heat Wave: Teleconnection of Hydrometeorological Extremes // J. Hydrometeor. V.13. 2012. P. 392-403.
111. Leij F.J., Alves W.J., van Genuchten M.Th. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database // Proc. of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Riverside, California, USA. 1999. 1602 p.

112. Lins H.F. Observed trends in hydrologic cycle components, in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, edited by: Anderson M.G. John Wiley, London, 2005.
113. Loveland T.R., Reed B.C., Brown J.F., Ohlen D.O., Zhu Z., Yang L., Merchant J.W. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data // International Journal of Remote Sensing. V.21(6-7). 2000. P. 1303-1330.
114. Masson D., Knutti R. Climate model genealogy // Geophys. Res. Let. V.38, L08703, 2011.
115. 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.
116. Motovilov Y., Danilov-Danilyan V., Dod Y., Kalugin A. Flood protection effect of the existing and projected reservoirs in the Amur River basin: evaluation by the hydrological modeling system // Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities. Proc. IAHS. V.370. 2015. P. 63-67.
117. 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.
118. 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.
119. National Oceanic and Atmospheric Administration. Natural disaster survey report: The Great Flood of 1993. Washington: U.S. Department of Commerce, 1994. 281 p.
120. Nohara D., Kitoh A., Masahiro H., Oki T. Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble // Journal of Hydrometeorology. V.7. 2006. P. 1076-1089.
121. Ogi M., Tachibana Y. Influence of the annual Arctic Oscillation on the negative correlation between Okhotsk Sea ice and Amur River discharge // Journal of Geophysical Research. V.33. L08709, 2006.
122. Peel M.C., Blöschl G. Hydrological modeling in a changing world // Prog. Phys. Geogr. V.35. 2011. P. 249-261.
123. Praskievicz S., Chang H. A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts // Rog. Phys. Geogr. V.33. 2009. P. 650-671.
124. Rawls W.J., Brakensiek D.L. Estimating soil water retention from soil properties // J. Irrig. Drainage. Div. ASCE. V.108. 1982. P. 166-171.
125. Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M. Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models, John Wiley. 2004.

126. Santer B.D., Mears C., Doutriaux C., Caldwell P., Gleckler P.J., Wigley T.M., Solomon S., Gillett N.P., Ivanova D., Karl T.R., Lanzante J.R., Meehl G.A., Stott P.A., Taylor K.E., Thorne P.W., Wehner M.F., Wentz F.J. Separating signal and noise in atmospheric temperature changes: The importance of timescale // *J. Geophys. Res.* V.116. D22105, 2011.
127. Saxton K.E., Rawls W.J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions // *Soil Sci. Soc. Am. J.* V.70. 2006. P. 1569-1578.
128. Shi X., Yu D., Warner E., Pan X., Petersen G., Gong Z., Weindorf D. Soil Database of 1:1,000,000 Digital Soil Survey and Reference System of the Chinese Genetic Soil Classification System // *Soil Survey Horizons.* V.45. 2004. P. 129-136.
129. Simonov E.A., Dahmer T.D. Amur-Heilong River Basin Reader. Hong Kong: Ecosystems Ltd, 2008. 426 p.
130. Singh R., Wagener T., van Werkhoven K., Mann M.E., Crane R. A trading-space-for-time approach to probabilistic continuous streamflow predictions in a changing climate—accounting for changing watershed behavior // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* V.15. 2011. P. 3591-3603.
131. Tachibana Y., Oshima K., Ogi M. Seasonal and interannual variations of Amur River discharge and their relationships to large-scale atmospheric patterns and moisture fluxes // *Journal of Geophysical Research.* V.113. D16102, 2008.
132. Teutschbein C., Seibert J. Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment Scale: A Review of Recent Modeling Strategies // *Geogr. Compass.* V.4. 2010. P. 834-860.
133. Taylor K.E. Summarizing multiple aspects of model performance in a signal diagram. PCMDI report №55. 2000. 29 p.
134. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. A Summary of the CMIP5 Experiment Design // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* V.93. 2012. P. 485-498.
135. Vano J.A., Lettenmaier D.P. A sensitivity-based approach to evaluating future changes in Colorado River discharge // *Climatic Change.* V.122. 2014. P. 621-634.
136. Watanabe S., Hajima T., Sudo K., Nagashima T., Takemura T., Okajima H., Nozawa T., Kawase H., Abe M., Yokohata T., Ise T., Sato H., Kato E., Takata K., Emori S., Kawamiya M. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5 experiments // *Geosci. Model Dev.* V.4. 2011. P. 845-872.
137. Weigel A., Knutti R., Liniger M., Appenzeller C. Risks of model weighting in Multimodel Climate Projections // *J. Climate.* V.23(15). 2010. P. 4175-4191.
138. Wilby R.L. Evaluating climate model outputs for hydrological applications // *Opinion, Hydrolog. Sci. J.* V.55. 2010. P. 1090-1093.

139. Wu T., Yu R., Zhang F., Wang Z., Dong M., Wang L., Jin X., Chen D., Li L. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: description and its performance for the present-day climate // *Clim. Dyn.* V.34. 2010. P. 123-147.
140. Yu L., Xia Z., Li J., Cai T. Climate change characteristics of Amur River // *Water Science and Engineering*. V.6(2). 2013. P. 131-144.
141. Yukimoto S., Yoshimura H., Hosaka M., Sakami T., Tsujino H., Hirabara M., Tanaka T.Y., Deushi M., Obata A., Nakano H., Adachi Y., Shindo E., Yabu S., Ose T., Kitoh A. Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) // Technical reports of the Meteorological Research Institute. No.64. 2011.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А.** Перечень метеостанций, расположенных в бассейне р. Амур и 100-км окрестности

№	Индекс	Наименование	Широта, <sup>о</sup> с.ш.	Долгота, <sup>о</sup> в.д.
1	30393	Чульман	56.83	124.87
2	30469	Калакан	55.12	116.77
3	30493	Нагорный	55.97	124.88
4	30499	Тында	55.18	124.67
5	30552	Моклакан	54.80	118.90
6	30565	Усть-Каренга	54.40	116.50
7	30567	Хулугли	54.00	115.00
8	30576	Тупик	54.40	119.90
9	30585	Гуля	54.70	120.90
10	30650	Романовка	53.20	112.80
11	30655	Юмурчен	53.60	114.10
12	30664	Тункогочен	53.53	115.62
13	30667	Кыкер	53.20	115.80
14	30669	Зилово	53.10	117.50
15	30673	Могоча	53.75	119.73
16	30675	Ксеньевская	53.50	118.70
17	30676	Часовая	53.40	119.90
18	30679	Горбица	53.10	119.20
19	30682	Амазар	53.87	120.87
20	30683	Ерофей Павлович	53.97	121.93
21	30686	Игнашино	53.50	122.40
22	30688	Покровка	53.40	121.60
23	30692	Сковородино	54.00	123.97
24	30695	Джалинда	53.50	123.90
25	30755	Бургень	52.40	113.80
26	30757	Беклемишево	52.10	112.70
27	30758	Чита	52.08	113.48
28	30764	Усугли	52.70	115.20
29	30765	Зюльзя	52.60	116.20
30	30766	Чернышевск	52.50	117.00
31	30768	Нерчинск	52.00	116.50

32	30772	Усть-Карск	52.70	118.80
33	30777	Сретенск	52.23	117.70
34	30778	Батакан	52.10	118.80
35	30781	Урюпино	52.80	120.00
36	30843	Могзон	51.73	112.00
37	30844	Хилок	51.35	110.47
38	30846	Улеты	51.35	112.47
39	30853	Карымская	51.63	114.32
40	30858	Дарасун	51.20	113.70
41	30859	Агинское	51.10	114.52
42	30862	Шилка	51.90	116.00
43	30866	Балей	51.60	116.70
44	30874	Шелопугино	51.70	117.60
45	30875	Ямкун	51.50	118.30
46	30879	Нерчинский з-д	51.32	119.62
47	30938	Менза	49.43	108.85
48	30941	Черемховский перевал	50.70	110.30
49	30944	Черемхово	50.58	110.15
50	30948	Букукун	49.50	111.10
51	30949	Кыра	49.57	111.97
52	30952	Дульдурга	50.68	113.58
53	30954	Мангут	49.70	112.67
54	30957	Акша	50.30	113.30
55	30961	Оловянная	50.95	115.58
56	30965	Борзя	50.40	116.52
57	30967	Соловьевск	49.90	115.80
58	30968	Забайкальск	49.63	117.33
59	30971	Александровский з-д	50.90	117.90
60	30972	Доно	50.90	118.60
61	30975	Ново-Цурухайтуй	50.40	119.10
62	30977	Краснокаменск	50.10	118.10
63	30978	Кайластуй	49.80	118.40
64	31137	Токо	56.28	131.13
65	31253	Бомнак	54.72	128.87
66	31257	Береговой	54.40	127.40



67	31263	Локшак	54.73	130.45
68	31285	Удское	54.50	134.42
69	31295	Магдагачи	53.47	125.82
70	31299	Тыгда	53.10	126.40
71	31301	Зея	53.70	127.30
72	31318	Дугда	53.40	130.00
73	31329	Экимчан	53.08	132.98
74	31348	Бурукан	53.10	136.00
75	31362	Литке	53.95	140.33
76	31366	Байдуков	53.30	141.50
77	31369	Николаевск-на-Амуре	53.13	140.70
78	31371	Черняево	52.78	126.00
79	31373	Октябрьский Прииск	53.00	128.70
80	31388	Норск	52.40	129.90
81	31392	Стойба	52.80	131.70
82	31397	Бысса	52.40	131.30
83	31416	Им. П.Осипенко	52.42	136.50
84	31418	Веселая горка	52.30	135.80
85	31423	Удинское	52.90	138.90
86	31436	Джаоре	52.70	141.30
87	31439	Богородское	52.38	140.47
88	31442	Шимановск	51.98	127.65
89	31443	Мазаново	51.63	128.82
90	31445	Свободный	51.45	128.12
91	31469	Чегдомын	51.20	132.90
92	31474	Усть-Умальта	51.63	133.27
93	31478	Софийский прииск	52.27	133.98
94	31484	Хуларин	51.42	135.08
95	31489	Горин	51.30	136.60
96	31502	Мариинск	51.70	140.20
97	31504	Сухановка	51.40	139.10
98	31510	Благовещенск	50.25	127.57
99	31511	Сергеевка	50.80	127.30
100	31513	Белогорск	50.90	128.50
101	31521	Братолюбовка	50.80	129.30

102	31527	Завитая	50.10	129.50
103	31534	Сектагли	50.40	131.00
104	31538	Сутур	50.10	132.10
105	31548	Верховье Урми	50.10	133.60
106	31561	Комсомольск-на-Амуре	50.53	137.03
107	31562	Нижне-Тамбовское	50.90	138.10
108	31566	Сегжема	50.40	138.40
109	31583	Малиновка	49.80	129.90
110	31586	Константиновка	49.60	128.00
111	31587	Поярково	49.60	128.70
112	31594	Архара	49.42	130.08
113	31624	Урми	49.40	133.20
114	31632	Кур	49.90	134.60
115	31647	Литовко	49.20	135.20
116	31655	Троицкое	49.45	136.57
117	31683	Тумнин	49.70	140.10
118	31702	Облучье	49.00	131.08
119	31707	Екатерино-Никольское	47.73	130.97
120	31710	Ленинское	47.90	132.60
121	31713	Биробиджан	48.73	132.95
122	31725	Смидович	48.62	133.83
123	31733	Елабуга	48.82	135.88
124	31735	Хабаровск	48.60	135.00
125	31754	Тивяку	48.60	137.10
126	31766	Иоли	48.60	139.00
127	31786	Вяземская	47.60	134.80
128	31788	Лермонтовка	47.10	134.30
129	31790	Георгиевка	48.00	135.20
130	31792	Бичевая	47.80	135.60
131	31801	Гвасюги	47.70	136.20
132	31815	Сукпай	47.70	137.50
133	31825	Агзу	47.60	138.40
134	31832	Бикин	46.80	134.27
135	31845	Красный Яр	46.50	135.30
136	31848	Глубинное	46.10	135.40

137	31856	Охотничий	46.50	136.90
138	31866	Сосуново	46.50	138.30
139	31873	Дальнереченск	45.87	133.73
140	31875	Лесозаводск	45.47	133.38
141	31876	Кировский	45.10	133.50
142	31884	Малиново	45.40	134.30
143	31895	Мельничное	45.50	135.50
144	31909	Терней	45.00	136.60
145	31913	Турий Рог	45.20	132.00
146	31915	Пограничный	44.40	131.38
147	31917	Полтавка	44.00	131.30
148	31921	Астраханка	44.70	132.10
149	31923	Новосельское	44.80	132.80
150	31924	Хороль	44.40	132.10
151	31928	Халкидон	44.30	132.40
152	31931	Свиягино	44.90	133.10
153	31935	Яковлевка	44.42	133.48
154	31939	Чугуевка	44.20	133.90
155	31942	Журавлевка	44.80	134.50
156	31943	Рощино	45.90	134.90
157	31946	Кавалерово	44.20	135.00
158	31958	Богополь	44.30	133.50
159	31959	Рудная пристань	44.40	135.90
160	31960	Владивосток	43.80	131.93
161	31961	Тимирязевский	43.90	131.90
162	31970	Находка	42.80	132.90
163	31971	Барабаш	43.20	131.50
164	31977	Майхе	43.40	132.40
165	31981	Анучино	43.97	133.07
166	31986	Лазо	43.40	133.90
167	31987	Партизанск	43.15	133.02
168	31989	Преображение	42.90	133.90
169	32027	Погиби	52.22	141.63
170	50136	Mohe	53.47	122.37
171	50246	Tahe	52.32	124.72

172	50349	New Lin	51.70	124.33
173	50353	Huma	51.72	126.65
174	50425	Erguna Youqi	50.25	120.18
175	50434	Figure in the river	50.48	121.68
176	50442	Greater hinggan mountains	50.40	124.12
177	50468	Heihe river	50.25	127.45
178	50514	The manchurian	49.57	117.43
179	50527	Hailar	49.22	119.75
180	50548	Small 2 channel	49.20	123.72
181	50557	Nenjiang	49.17	125.23
182	50564	The three	49.43	127.35
183	50603	New barr tiger Youqi	48.67	116.82
184	50618	New barr tiger Zuoqi	48.22	118.27
185	50632	Bork chart	48.77	121.92
186	50639	Zhalantun	48.00	122.73
187	50656	So soon	48.28	126.52
188	50658	Keshan	48.05	125.88
189	50727	Stretching over	47.17	119.95
190	50742	Rich	47.80	124.48
191	50745	Qiqihar	47.38	123.92
192	50756	BaiQuan	47.43	126.97
193	50758	MingShui	47.17	125.90
194	50774	Yichun	47.73	128.92
195	50775	Hegang	47.37	130.33
196	50788	At its	47.23	131.98
197	50834	Sauron	46.60	121.22
198	50838	WuLanHaoTe	46.08	122.05
199	50844	Ty to	46.40	123.42
200	50853	SuiHua	46.62	126.97
201	50854	Anda	46.38	125.32
202	50862	Tie li	46.98	128.02
203	50873	Jiamusi	46.82	130.28
204	50877	Ylang	46.30	129.58
205	50888	Baoqing	46.32	132.18
206	50936	Baicheng	45.63	122.83

207	50948	QianAn	45.00	124.02
208	50949	The former Guo Er Ross	45.12	124.83
209	50950	Zhou of zhaozhou	45.70	125.25
210	50953	Harbin	45.75	126.77
211	50963	Tong river	45.97	128.73
212	50968	ShangZhi	45.22	127.97
213	50978	Jixi	45.28	130.95
214	50983	HuLin	45.77	132.97
215	54041	Tongyu	44.78	123.07
216	54049	Changling	44.25	123.97
217	54063	Three ChaHe	44.97	126.00
218	54094	Mudanjiang	44.57	129.60
219	54096	Suifenhe	44.38	131.15
220	54161	Changchun	43.90	125.22
221	54169	Pipe mountain	43.30	126.02
222	54171	Younge	43.70	126.52
223	54172	Jilin	43.95	126.47
224	54181	Fall river	43.70	127.33
225	54186	The city	43.37	128.20
226	54192	Luo Zihe	43.70	130.25
227	54195	Pools	43.33	129.77
228	54263	Rock	42.97	126.03
229	54273	Birch survey	42.98	126.75
230	54284	East hills	42.10	127.57
231	54285	Songjiang	42.53	128.25
232	54292	Yenji	42.88	129.47

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б.** Фактические и рассчитанные суточные гидрографы рек бассейна Амура за период калибровки и верификации модели

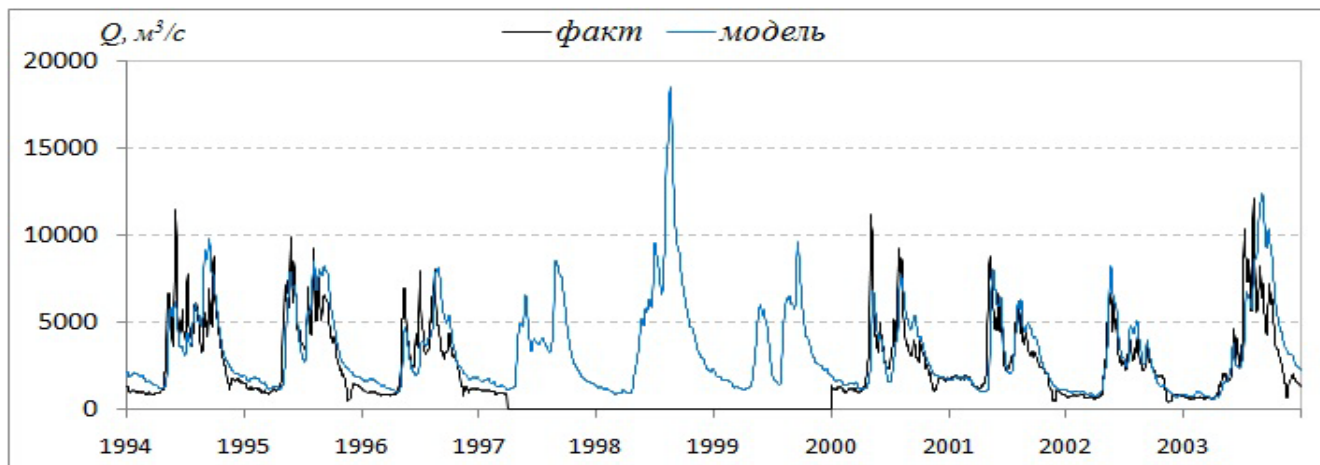


Рисунок 1 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Гродеково за период калибровки модели

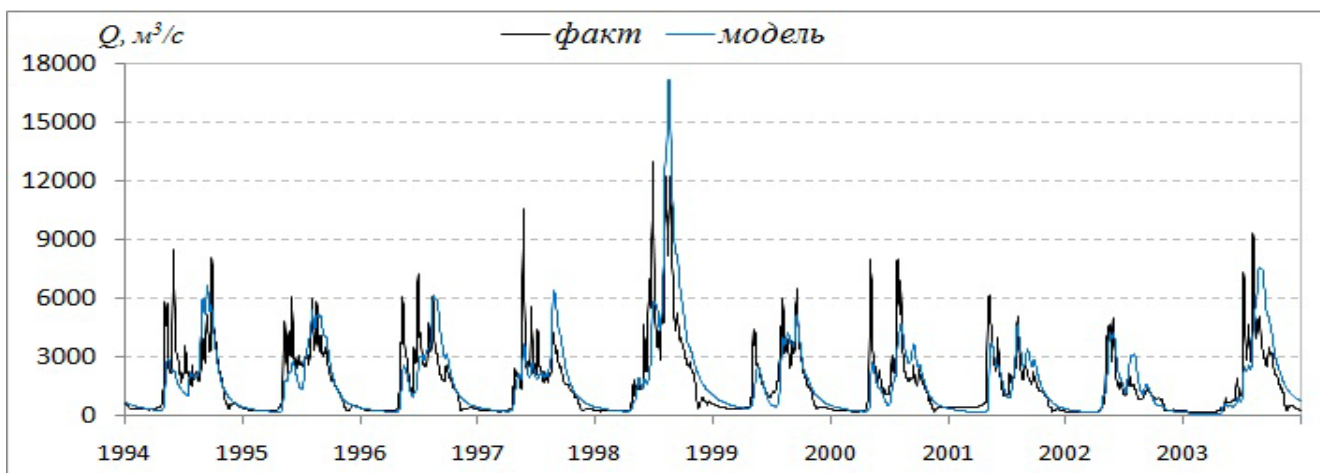


Рисунок 2 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Кумара за период калибровки модели

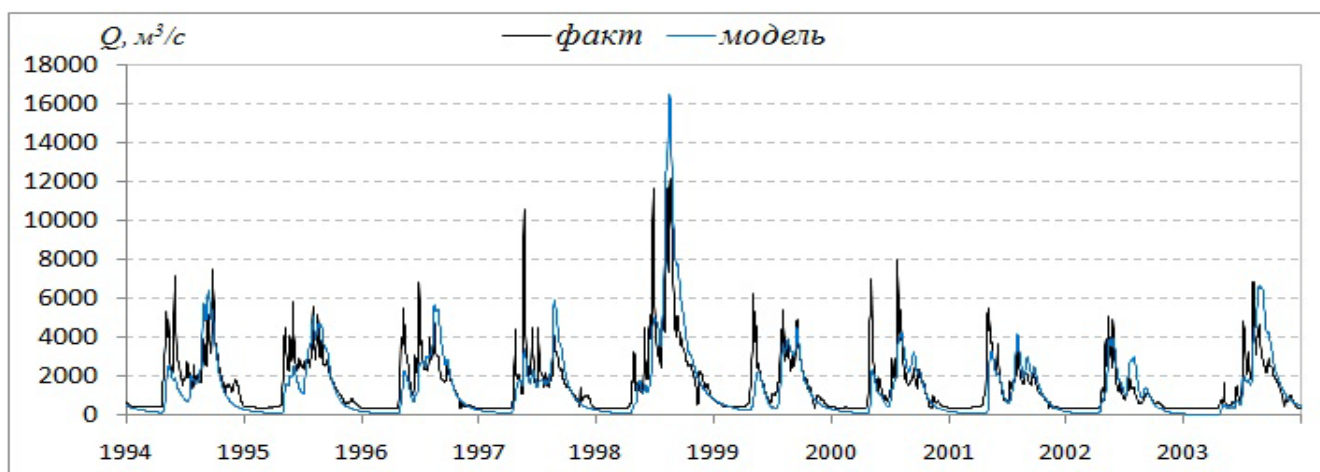


Рисунок 3 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Черняево за период калибровки модели



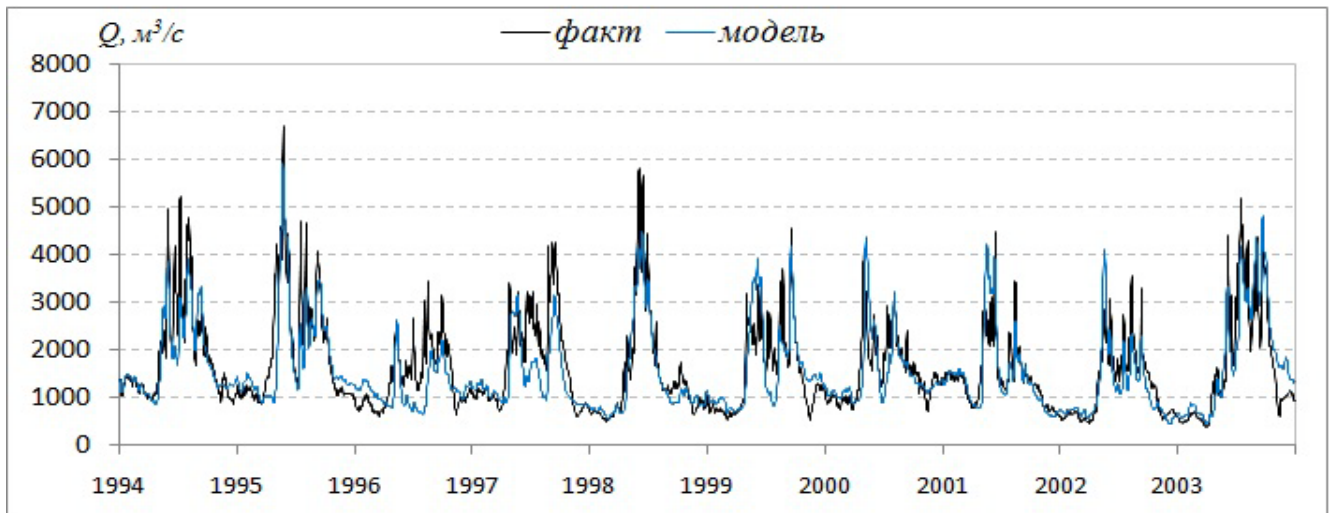


Рисунок 4 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Зеи в створе  
с. Белогорье за период калибровки модели

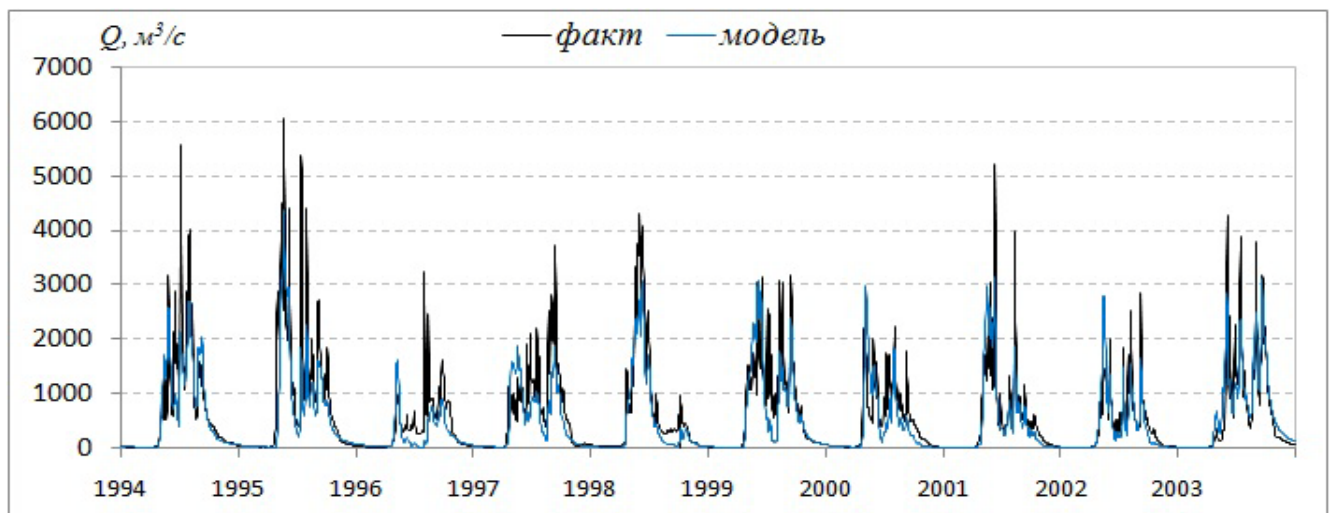


Рисунок 5 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Селемджи в створе  
с. Усть-Ульма за период калибровки модели

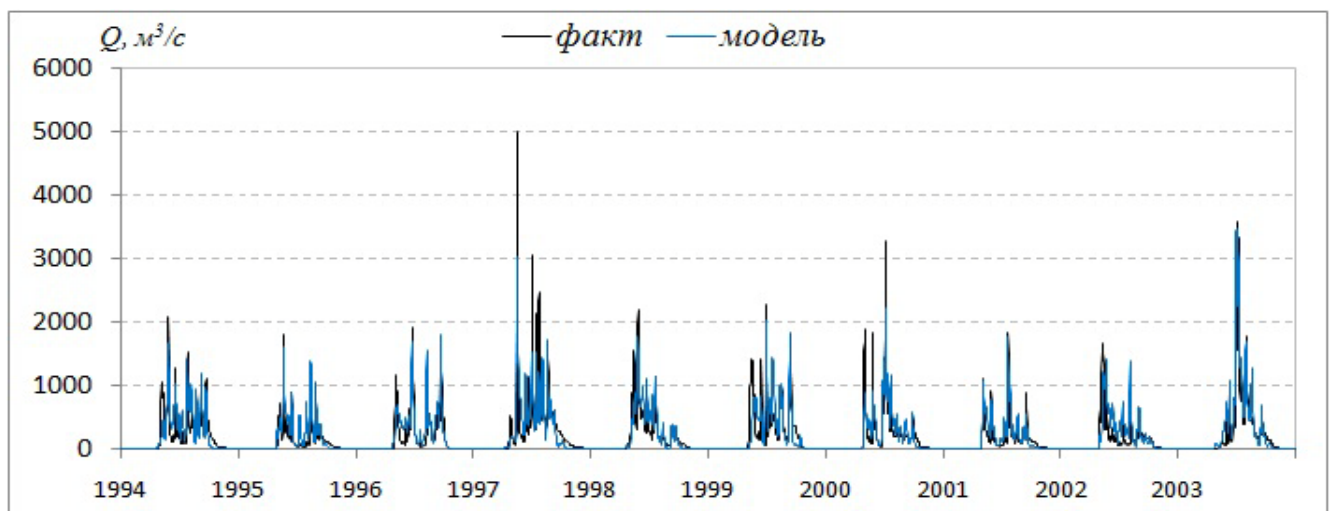


Рисунок 6 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Гилюй в створе  
с. У перевоза за период калибровки модели

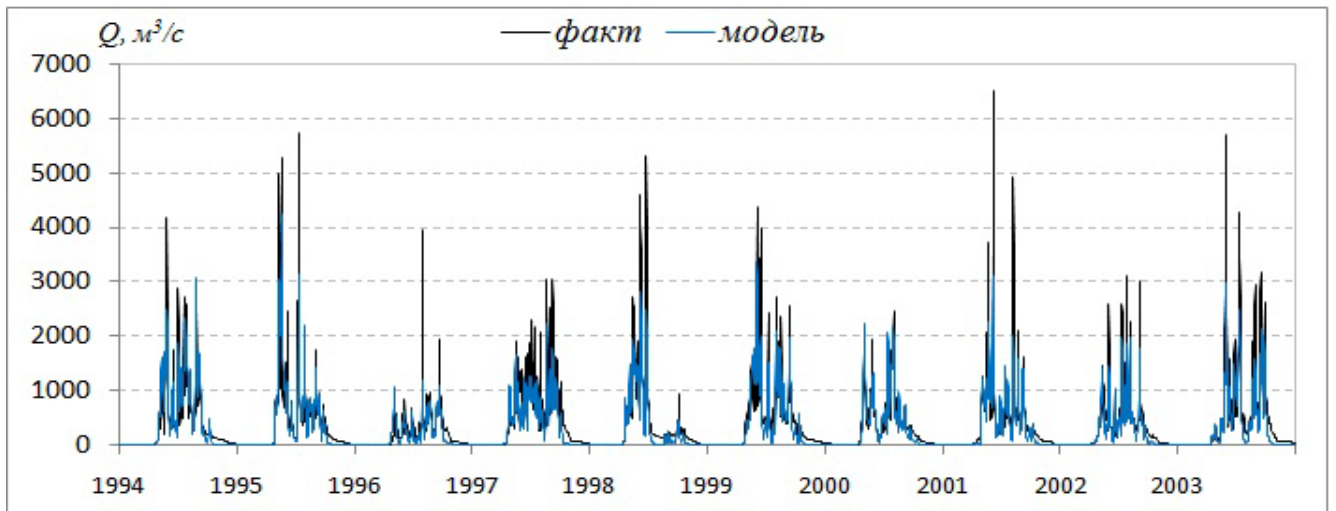


Рисунок 7 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Буреи в створе с. Усть-Ниман за период калибровки модели

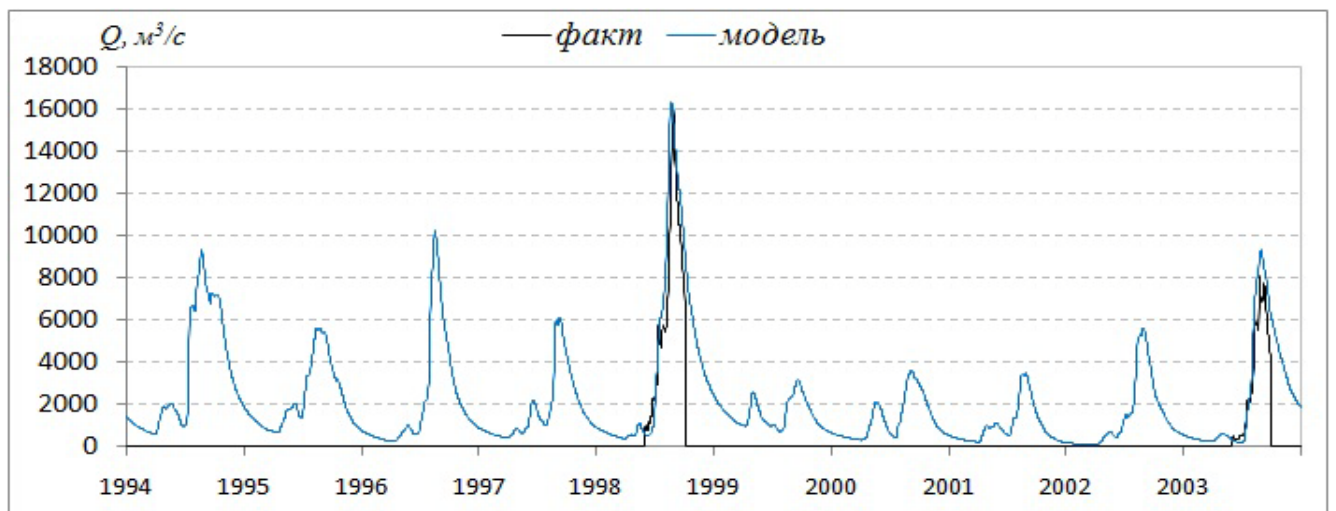


Рисунок 8 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Сунгари в створе г. Цзямусы за период калибровки модели

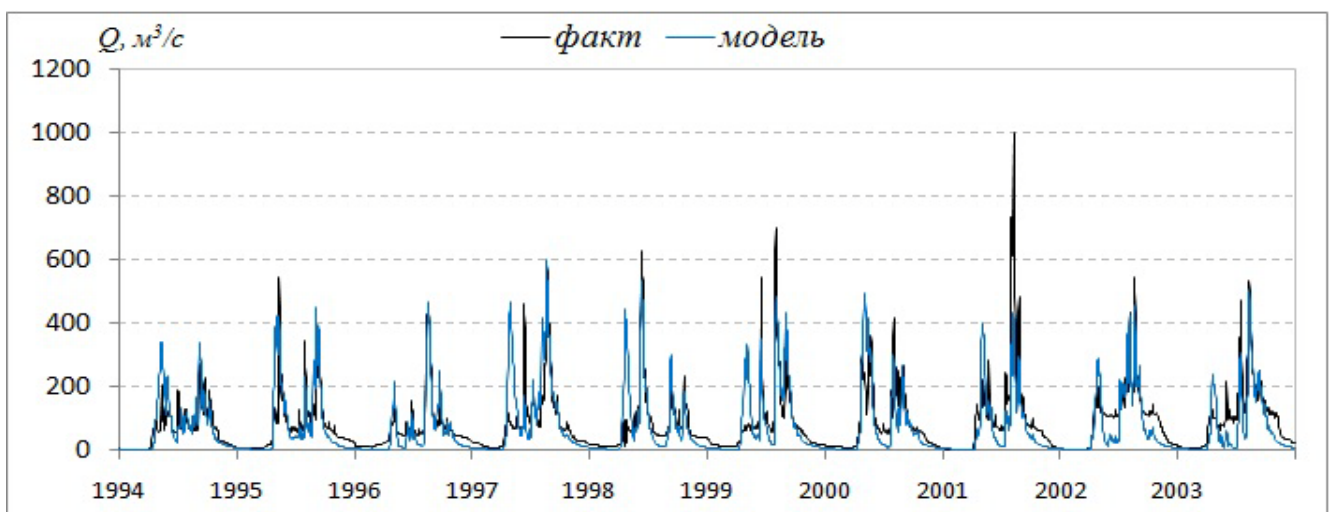


Рисунок 9 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Большая Бира в створе г. Биробиджан за период калибровки модели

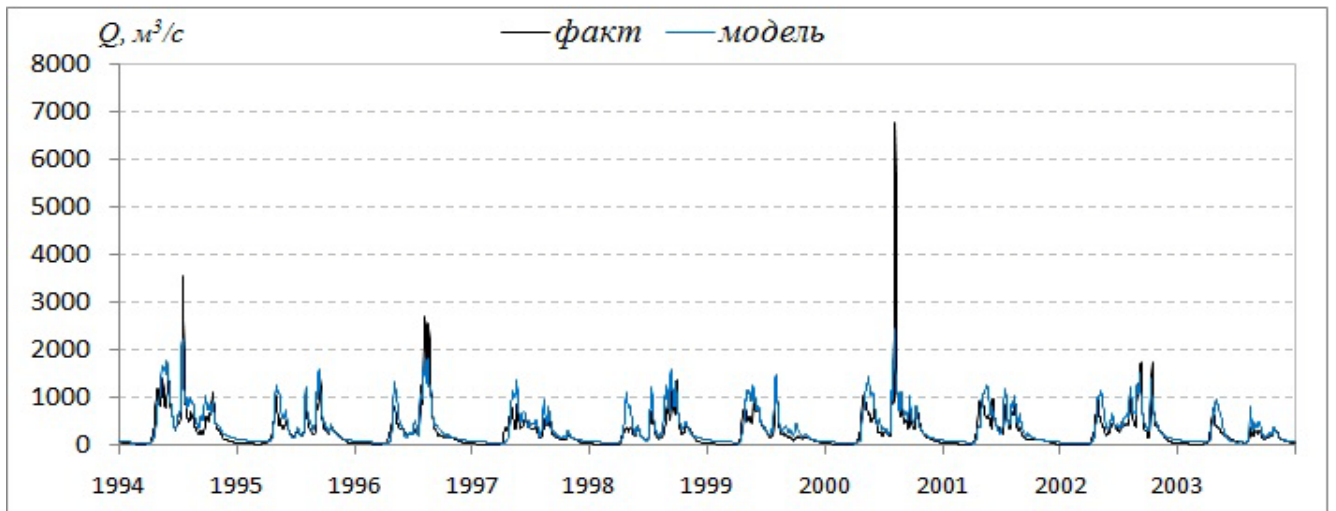


Рисунок 10 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Большая Уссурка в створе п. Вагутон за период калибровки модели

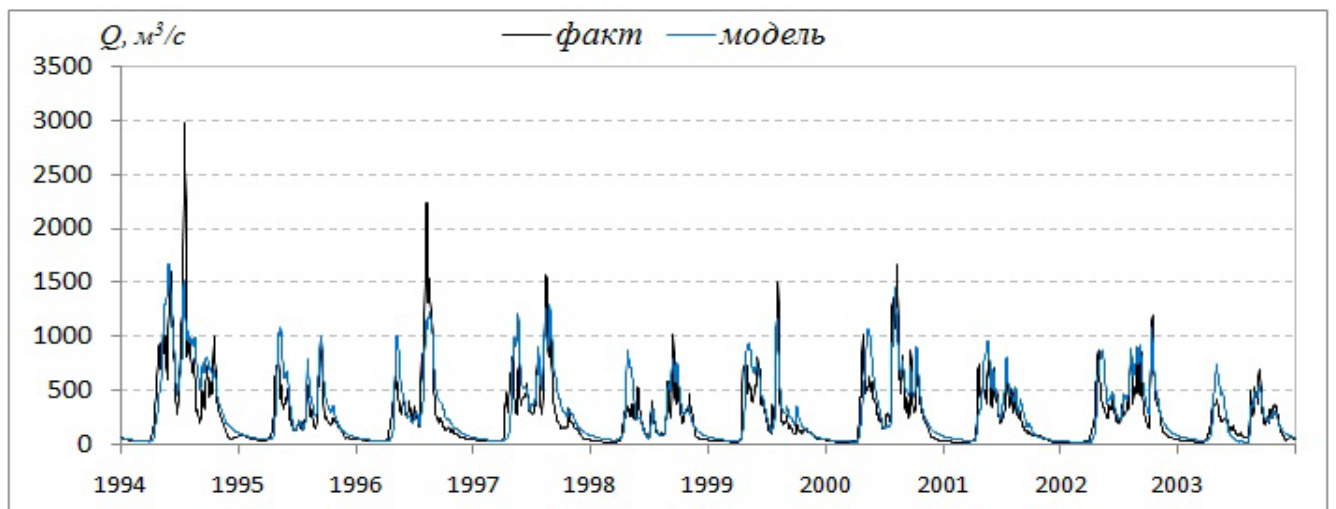


Рисунок 11 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Бикин в створе ст. Звеневской за период калибровки модели

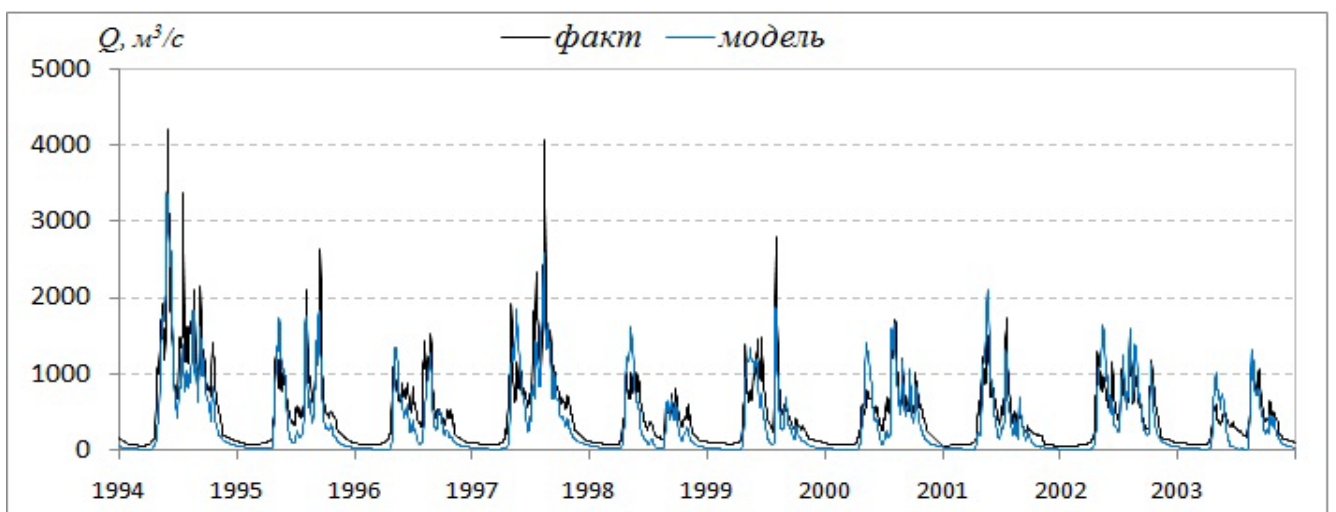


Рисунок 12 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Хор в створе пгт Хор за период калибровки модели

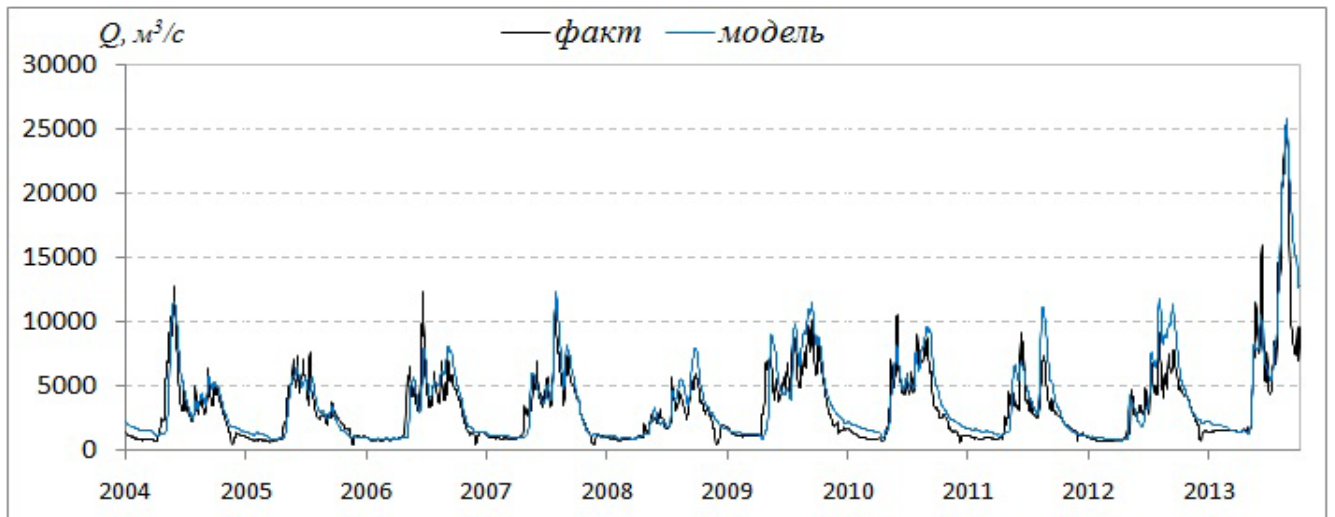


Рисунок 13 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Гродеково за период верификации модели

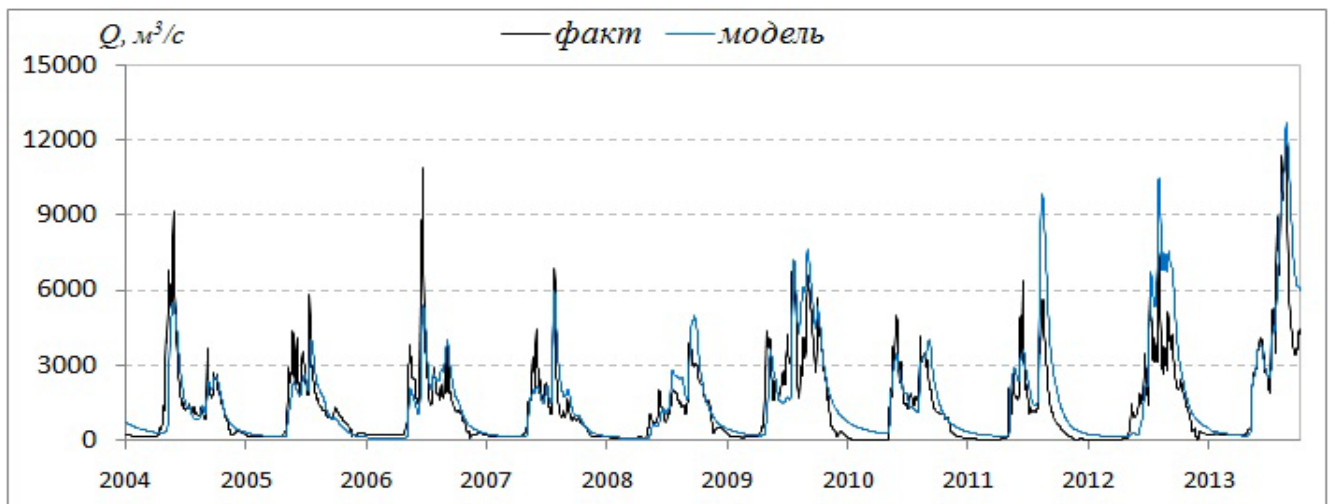


Рисунок 14 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Кумара за период верификации модели

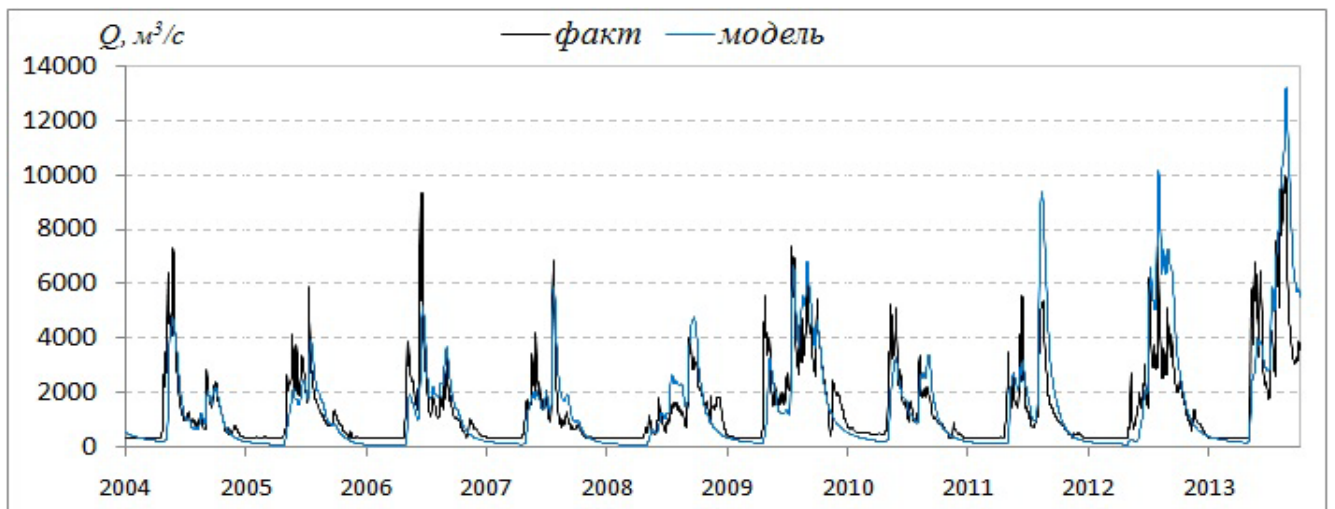


Рисунок 15 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Амур в створе с. Черняево за период верификации модели



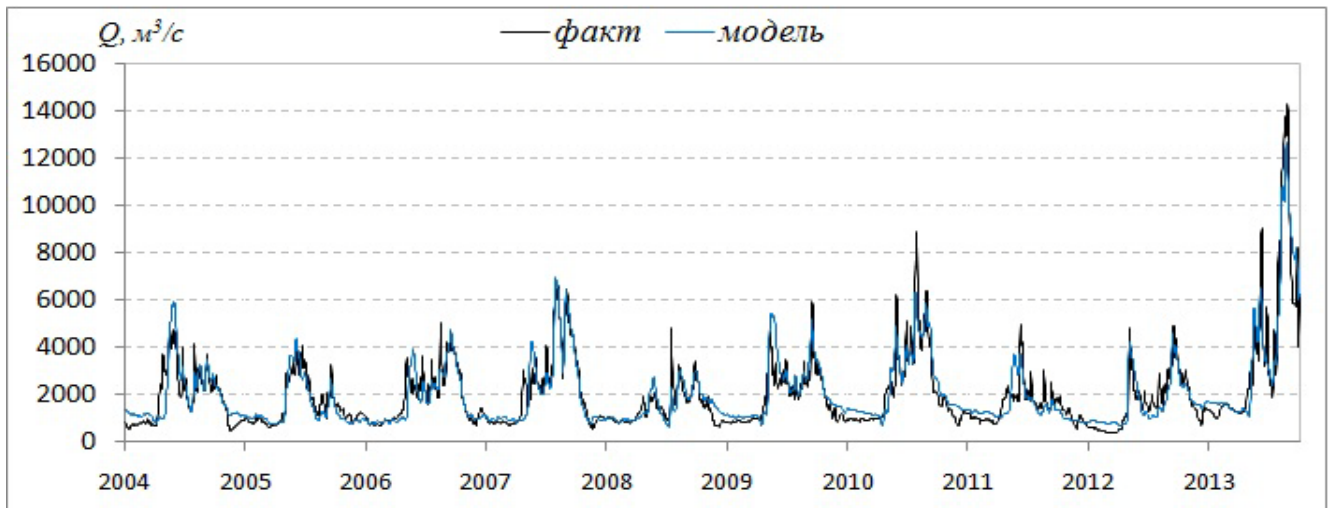


Рисунок 16 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Зеи в створе с. Белогорье за период верификации модели

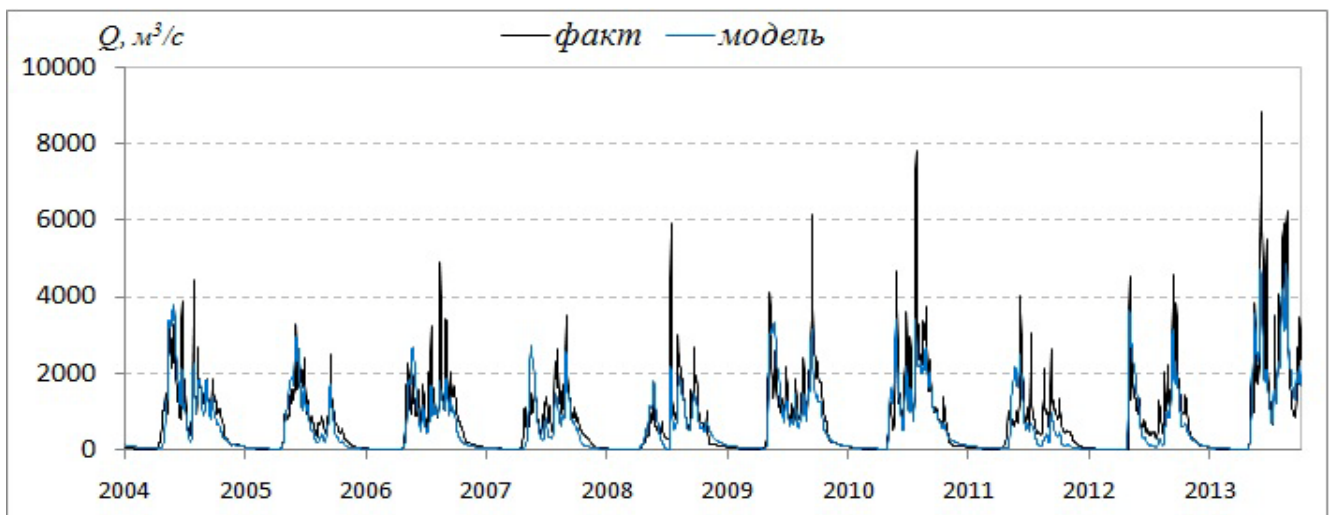


Рисунок 17 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Селемджи в створе с. Усть-Ульма за период верификации модели

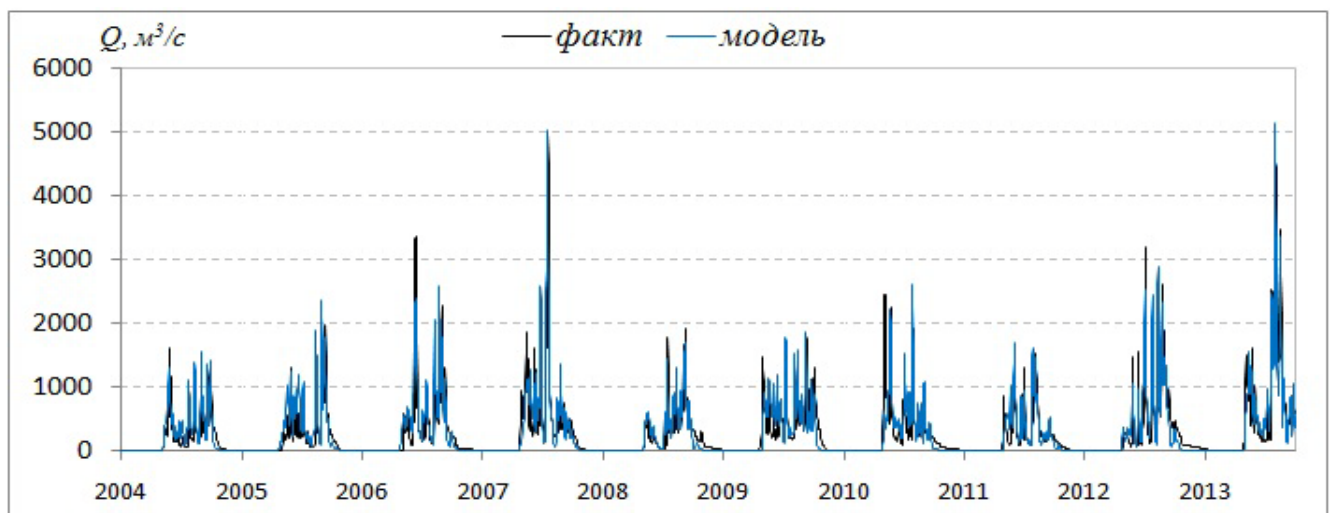


Рисунок 18 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Гилюй в створе с. У перевоза за период верификации модели

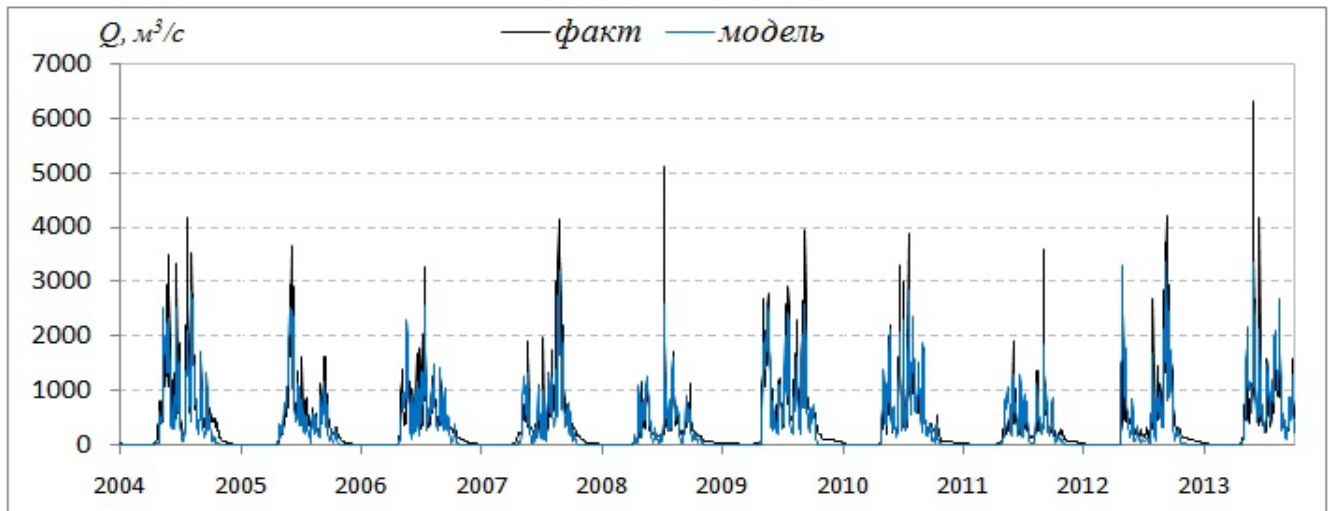


Рисунок 19 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Буреи в створе с. Усть-Ниман за период верификации модели

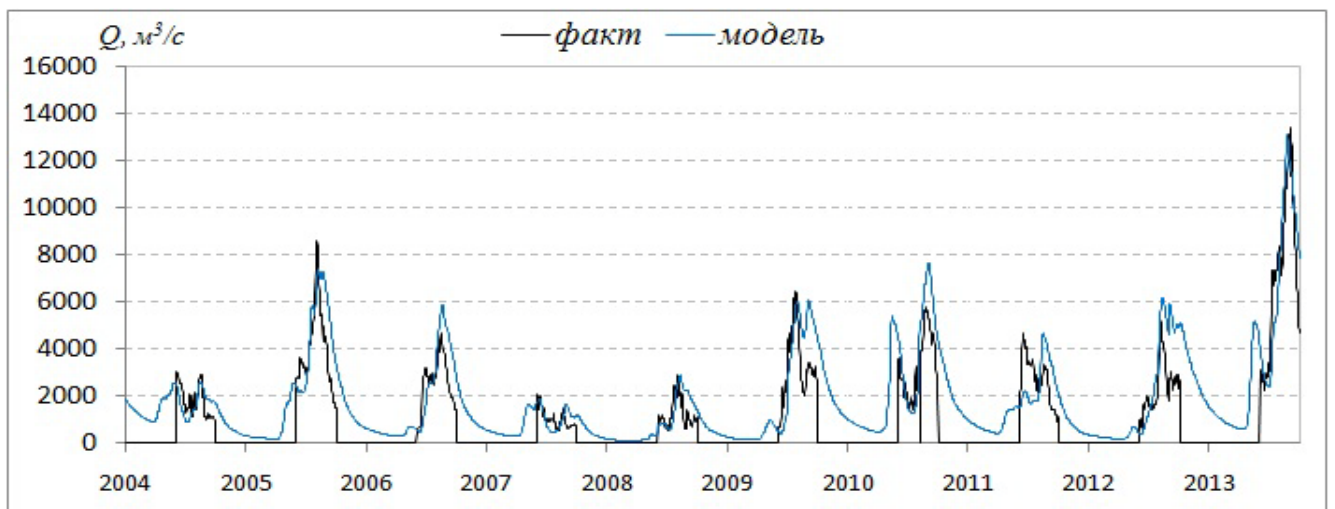


Рисунок 20 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Сунгари в створе с. Цзямусы за период верификации модели

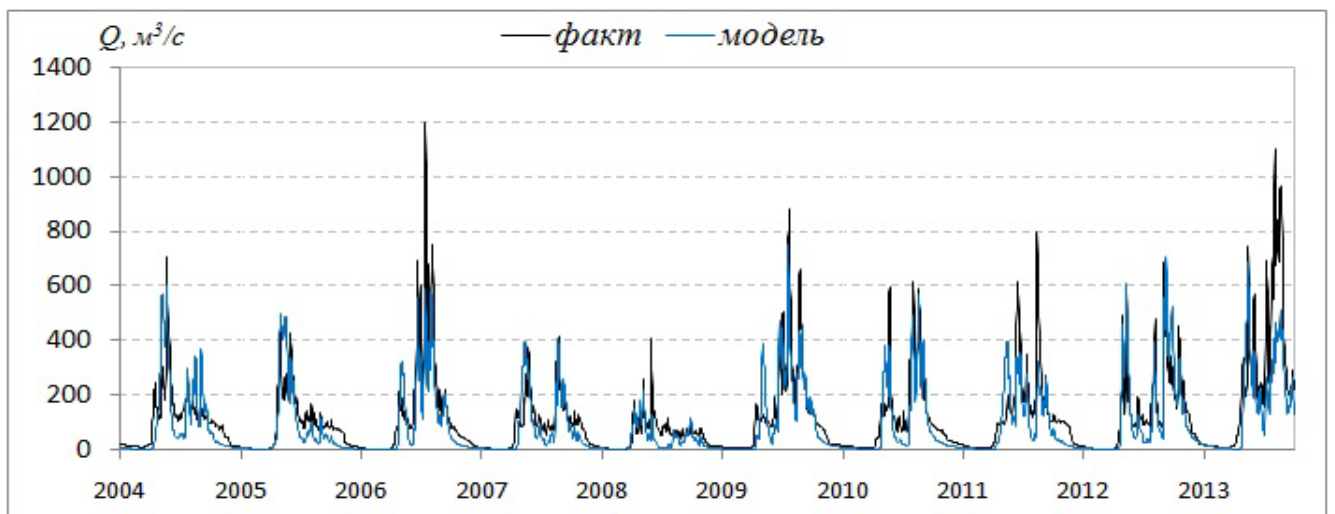


Рисунок 21 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Большая Бира в створе г. Биробиджан за период верификации модели



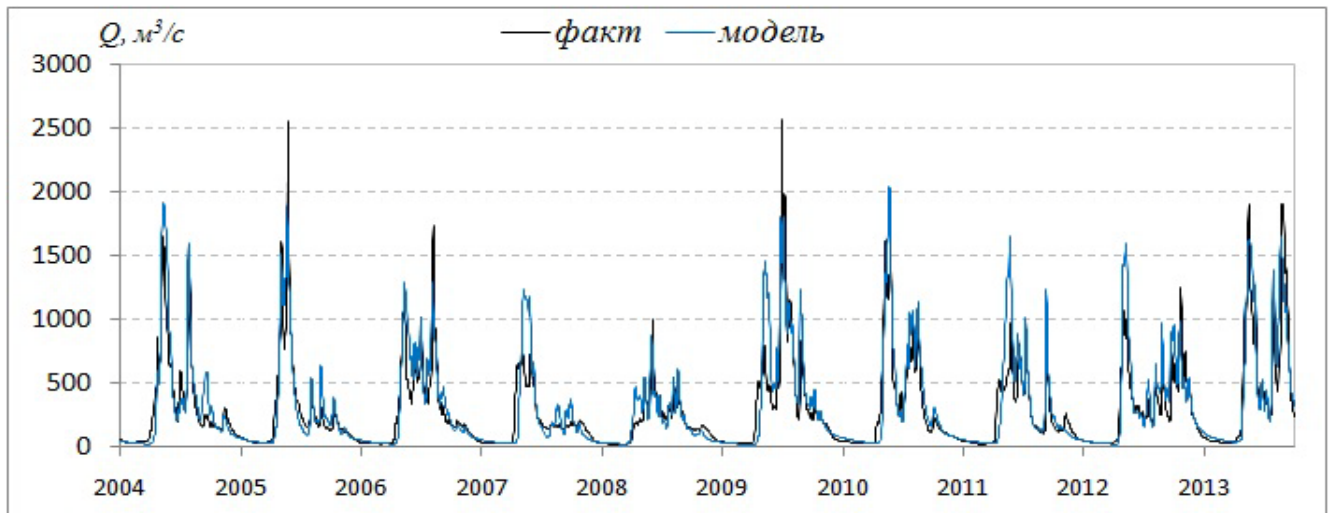


Рисунок 22 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Большая Уссурка в створе п. Вагутон за период верификации модели

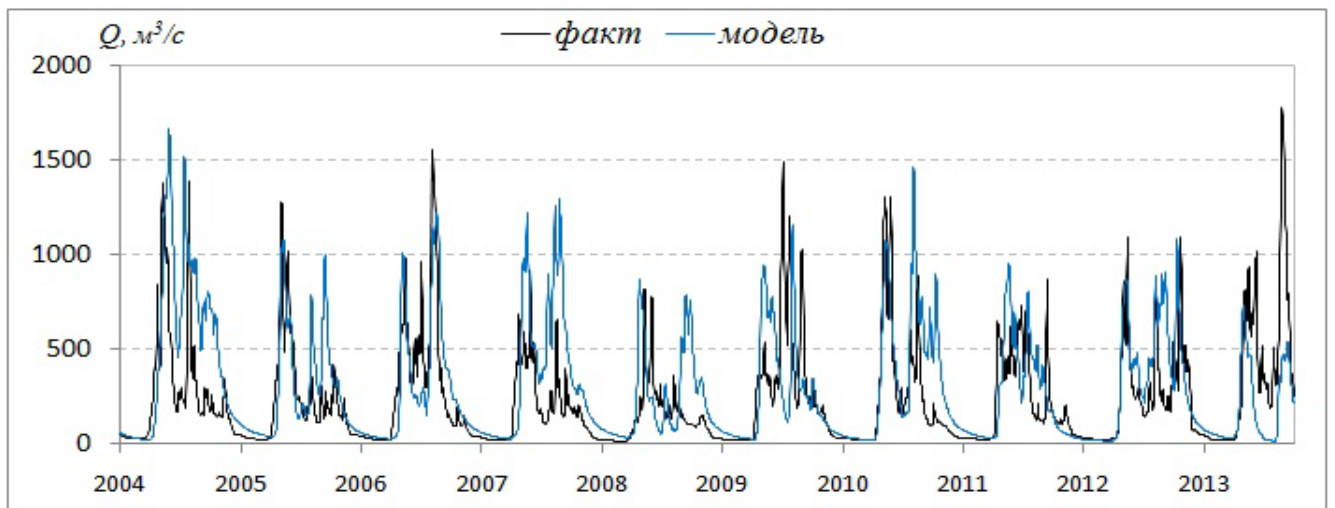


Рисунок 23 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Бикин в створе ст. Звенъевой за период верификации модели

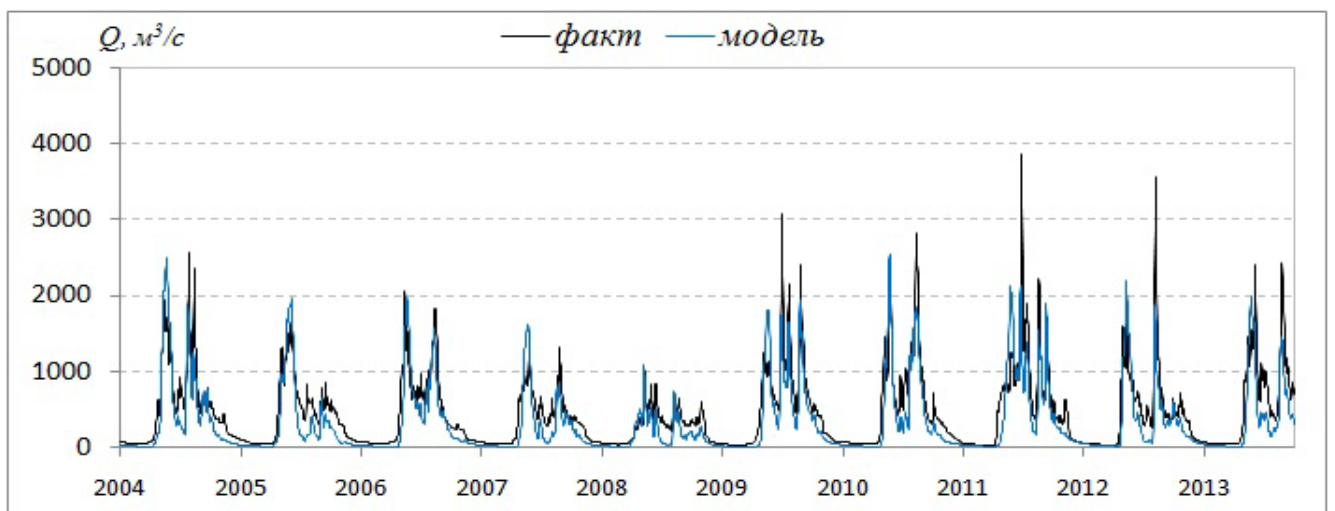


Рисунок 24 – Фактические и рассчитанные суточные гидрографы р. Хор в створе пгт Хор за период верификации модели