

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

*на правах рукописи*



**Миллионщикова Татьяна Дмитриевна**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЕ МНОГОЛЕТНИХ  
ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА Р. СЕЛЕНГИ**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2019

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

**Научный руководитель:** **Гельфан Александр Наумович**  
*доктор физико-математических наук*  
(специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия)

**Официальные оппоненты:** **Корытный Леонид Маркусович**  
*доктор географических наук, профессор*  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск)  
**Георгиади Александр Георгиевич**  
*кандидат географических наук*  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук (г. Москва)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Географический факультет, кафедра гидрологии суши (г. Москва)

Защита состоится «**21**» **марта 2019** года в **14 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН (<http://www.iwrp.ru>), а также на сайте ВАК (<http://vak.ed.gov.ru/>).

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

Автореферат разослан «\_\_\_» января 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

М.А. Соколовский



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Анализ физических механизмов отклика гидрологической системы речного бассейна на происходящие и прогнозируемые изменения климата – актуальная проблема гидрологии суши, для решения которой все шире используются современные физико-математические модели формирования речного стока с распределенными параметрами. Разработка таких моделей для крупных речных бассейнов России усложняется вследствие разреженности данных гидрометеорологического мониторинга, недостаточности информации о характеристиках подстилающей поверхности. Бассейн р. Селенги (площадь водосбора 447 тыс. км<sup>2</sup>) – крупнейшей реки, впадающей в оз. Байкал и обеспечивающей до половины ежегодного притока воды в озеро, располагается на территории двух государств, России и Монголии, что еще больше затрудняет построение надежной физико-математической модели и обеспечения ее однородными данными мониторинга. Вместе с тем, проблема разработки такой модели для бассейна р. Селенги и получения с ее помощью оценок будущих изменений водного режима стала особенно актуальной в связи с наблюдающимся в этом бассейне более чем 20-летним маловодьем, самым продолжительным за период инструментальных наблюдений, поскольку сток реки влияет на гидрологический, гидрохимический и экологический режимы оз. Байкал.

Среди немногих гидрологических моделей, разработанных для бассейна р. Селенги, большинство описывают формирование речного стока только на монгольской части бассейна (Batima, 2006; Menzel et al., 2008; Malsy et al., 2013; Hülsmann et al., 2015). Для всего бассейна р. Селенги региональная гидрологическая модель представлена в двух недавних публикациях (Морейдо и Калугин, 2017; Karthe et al., 2017), однако приведенные результаты не позволяют оценить возможности модели для воспроизведения современных тенденций изменения водности бассейна и получения устойчивых оценок гидрологических последствий прогнозируемых изменений климата. Существует также опыт использования глобальных гидрологических моделей для оценки характеристик водного режима в бассейне р. Селенги (например, (Törnqvist et al., 2014), но расчеты по глобальным моделям содержат значительную неопределенность (см., например, (Krysanova et al., 2018), и их применимость для отдельных речных бассейнов не очевидна.

Надежность оценок гидрологических последствий изменения климата зависит не только от способности модели к воспроизведению наблюдаемых изменений водного режима, но и от ее робастности - устойчивости параметров и структуры модели к изменению климатических характеристик, т.е. работоспособности модели в

климатических условиях, отличных от наблюдавшихся за период инструментальных наблюдений, данные которых использовались при ее разработке, калибровке и проверке. Проблема оценки робастности гидрологической модели, как необходимого (но не достаточного) условия ее применимости в задачах изменения климата, - сравнительно новая область современной гидрологии речных бассейнов, и ее решение особенно актуально для бассейнов с ярко выраженными изменениями водного режима (Gelfan et al., 2015a).

Построение физико-математической модели бассейна р. Селенги с распределенными параметрами, воспроизведение с ее помощью современных многолетних фаз водного режима, исследование робастности модели, анализ чувствительности речного стока к изменениям климатических параметров, оценка его возможных изменений при прогнозируемых изменениях климата в этом бассейне и анализ неопределенности полученных оценок составляют основное содержание диссертационной работы.

#### **Цели работы:**

- разработка региональной физико-математической модели формирования стока р. Селенги на основе информационно-моделирующего комплекса (ИМК) ЕСОМАГ (Motovilov et al., 1999) - модели, которая опирается на детальные данные о пространственном распределении характеристик подстилающей поверхности (рельефа, свойств почв, растительности, ландшафтов) и описывает пространственно-временную изменчивость гидрологических процессов на всей территории бассейна по метеорологическим данным;
- разработка и применение специальных тестов для оценки эффективности гидрологической модели и ее робастности;
- анализ чувствительности характеристик водного режима р. Селенги к изменениям климатических параметров;
- оценки возможных изменений стока р. Селенги в XXI веке на основе численных экспериментов с региональной гидрологической моделью и с использованием данных глобальных моделей климата; анализ неопределенности полученных оценок.

**Объект и исходные материалы исследований.** Объект исследования – бассейн р. Селенга. Для проведения исследования использовались архивные данные гидрологического мониторинга, метеорологического реанализа EWEMBI для российской и монгольской частей бассейна, глобальные базы данных и картографические источники о характеристиках подстилающей поверхности бассейна, данные расчетов глобальных

моделей климата. Моделирование формирования речного стока выполнялось с помощью информационно-моделирующего комплекса ЕСОМАГ (правообладатель ИВП РАН).

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработана физико-математическая модель формирования стока для бассейна р. Селенги, позволяющая воспроизводить по данным метеорологического реанализа современные тенденции изменения водности рек бассейна, включая выдающееся маловодье последних десятилетий.
2. Предложена и реализована процедура тестирования гидрологической модели, предназначенной для расчета гидрологических последствий изменения климата. Процедура включает новые оценки робастности модели, основанные на анализе выборочной изменчивости критерия эффективности модели для климатически контрастных периодов.
3. Оценена чувствительность средних значений и показателей вариации годового и максимального стока р. Селенги к изменению климатических параметров.
4. Оценены возможные изменения характеристик стока р. Селенги в XXI веке, рассчитана неопределенность полученных оценок, обусловленная неопределенностью климатических проекций.

**Практическая значимость проведенных исследований заключается:**

1. В разработке и апробации региональной физико-математической модели формирования стока в бассейне р. Селенга, позволяющей с удовлетворительной по принятым критериям точностью рассчитать гидрографы стока разного временного усреднения (сутки, месяц, год) в основном русле реки и на ее притоках за многолетний период.
2. В создании для всего бассейна р. Селенга базы данных, которая включает в себя архив многолетних гидрологических и метеорологических данных суточного разрешения; баз пространственно-распределенных данных о характеристиках рельефа, почв, землепользования для российской и монгольской частей водосбора, а также архивов метеорологических характеристик, рассчитанных по данным глобальных моделей климата.
3. В разработке процедуры оценки робастности модели формирования стока по отношению к изменению климатических параметров, которая может быть рекомендована для анализа применимости гидрологических моделей в задачах оценки возможных изменений водных ресурсов при прогнозируемых изменениях климата.

### **Защищаемые положения:**

1. Разработанная физико-математическая модель позволяет воспроизводить по многолетним данным метеорологического реанализа происходящие изменения речного стока в бассейне р. Селенги с различным временным разрешением (сутки, месяц, год) и с удовлетворительной, по принятым критериям, точностью.
2. Робастность гидрологической модели по отношению к изменению климатических параметров может быть оценена с помощью предложенного автором статистического критерия, основанного на анализе изменчивости показателя эффективности расчетов для климатически контрастных периодов.
3. Основной вклад в наблюдаемое в 1996-2013-х годах 30%-е уменьшение водности р. Селенги (по сравнению с многоводным периодом 1983-1995 гг.), как показали численные эксперименты по анализу чувствительности стока к климатическим параметрам, внесло произошедшее за этот период 10%-е уменьшение осадков. Влияние роста испарения вследствие увеличения температуры воздуха на  $0.4^{\circ}\text{C}$  оказалось менее значимым.
4. Возможный рост среднегодовой нормы осадков может увеличить не только норму, но и дисперсию характеристик максимального стока р. Селенги, что, в свою очередь, может привести к росту частоты экстремальных гидрологических явлений
5. Возможные изменения климата в бассейне р. Селенги в XXI веке, прогнозируемые с помощью ансамбля глобальных моделей климата, могут привести (при наиболее «жестких» сценариях будущих радиационных воздействий) к уменьшению водности реки к концу столетия на 10-25% по отношению к современному маловодному периоду.

**Обоснованность и достоверность результатов работы.** Результаты расчетов по модели формирования стока были проверены на материалах наблюдений, полученных в надежных источниках (данные гидрологического мониторинга Росгидромета и Национального агентства по метеорологии, гидрологии и мониторингу окружающей среды Монголии, глобальные базы данных). Для проверки эффективности расчетов использованы принятые в гидрологическом сообществе методики.

**Личный вклад автора.** Разработка модели формирования стока р. Селенги на базе ИМК ЕСОМАГ, создание архивов многолетних гидрометеорологических данных суточного разрешения, пространственно-распределенных данных о характеристиках подстилающей поверхности бассейна, калибровка и верификация модели формирования стока по данным реанализа, оценка робастности модели формирования стока р. Селенга по отношению к изменению климатических параметров, анализ чувствительности

гидрологической системы бассейна р. Селенги к изменению климатических параметров с использованием метеорологических данных за исторический период, проведение и обработка результатов численных экспериментов по оценке последствий изменения климата в бассейне р. Селенги по данным реанализа за исторический период и по данным глобальных климатических моделей за XXI век; анализ источников неопределенности расчетных оценок возможных изменений стока р. Селенги в XXI веке – все это сделано лично автором диссертационного исследования.

Использованный в работе ИМК ЕСОМАГ был разработан ранее в Институте водных проблем РАН Ю.Г. Мотовиловым. Статистическая процедура оценки робастности модели разработана научным руководителем при участии автора.

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

Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза (Австрия, г. Вена, 2017, 2018); Всероссийская научная конференция с международным участием «Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения» (Сочи, 2017); The Second International Young Scientists Forum on Soil and Water Conservation and ICCE symposium 2018 "Climate Change Impacts on Sediment Dynamics: Measurement, Modelling and Management" (Moscow, Russia, 2018); GMIT Symposium on Environmental Science and Engineering. Session D: basenet - Water Management in the Lake Baikal - Selenga River Basin (Mongolia, Nalaikh, 2018); School for Young Scientists "Modelling and forecasting of river flows and managing hydrological risks: towards a new generation of methods" (Moscow, Russia, 2018).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, из них 2 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем работы составляет 133 страницы, включая 83 рисунка и 33 таблицы. Библиографический список содержит 162 наименования.

**Благодарности.** Выражаю глубокую благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Гельфану А.Н. за всестороннюю помощь при выполнении данной диссертационной работы, зав. лаб., к.г.н. Мотовилову Ю.Г. за помощь в работе с моделью, к.г.н. Морейдо В.М. и к.г.н. Калугину А.С. за помощь в проведении модельных расчетов, к.г.н. Чалову С.Р. за предоставление возможности участвовать в экспедиционных исследованиях бассейна р. Селенги, а также всему коллективу Отдела гидрологии речных бассейнов ИВП РАН за помощь при подготовке диссертационной работы. Я благодарю свою семью за терпение и поддержку в ходе работы над диссертацией.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **главе 1** дан обзор исследований по оценке изменений речного стока и климата в бассейне р. Селенги на основе многолетних данных гидрометеорологических наблюдений и результатов моделирования.

В **разделе 1.1** описываются физико-географические, климатические и гидрологические характеристики бассейна р. Селенги.

В **разделе 1.2** приводится обзор существующих исследований, посвященных оценкам многолетних изменений характеристик климата и речного стока р. Селенги по данным гидрометеорологических наблюдений Росгидромета и Национального агентства по метеорологии, гидрологии и мониторингу окружающей среды Монголии. Основной чертой многолетних колебаний стока рек бассейна Селенги является выраженное чередование периодов многоводных и маловодных лет (Афанасьев, 1976; Шимараев и др., 2002; Korytny et al., 2003; Волошин и др., 2006; Птицын и др., 2010; Гармаев, Христофоров, 2010; Потемкина, 2011; Синюкович и др., 2013; Обязов и Смахтин, 2012; Марченко, 2013; Фролова и др., 2017). Анализ результатов исследований, в частности, показал, что для бассейна р. Селенги в условиях современных глобальных изменений климата характерны рост климатической нормы годовой температуры воздуха и сокращение нормы годовых осадков (Обязов, 1999; Шимараев и др., 2002; Korytny et al., 2003; Мещерская и др., 2009; Абасов и др., 2010; Хажеева, 2014; Фролова и др., 2017). С середины 1990-х годов по настоящее время наблюдается самый продолжительный маловодный период за весь период наблюдений. По сравнению с базовым периодом 1961-1990 гг., за 1996-2015 гг. отмечается уменьшение стока Селенги в 1.4 раза (Фролова и др., 2017). В работах (Гармаев, Христофоров, 2010; Бережных и др., 2012; Хажеева, 2014; Чалов и др., 2016; Antokhina et al., 2016, 2018; Фролова и др., 2017) отмечается, что сокращение среднегодового стока происходит главным образом за счет уменьшения стока летних паводков вследствие сокращения суммарных и максимальных осадков в летний период.

**Раздел 1.3** посвящен обзору существующего опыта моделирования регионального климата и речного стока в бассейне р. Селенги. Рассмотрены оценки гидрологических



последствий прогнозируемых изменений климата с помощью глобальных (Malsy et al., 2012; 2013; Törnqvist et al., 2014 и др.) и региональных (Batima, 2006; Menzel et al., 2008; Морейдо и Калугин, 2017 и др.) гидрологических моделей на основе ансамблевых экспериментов с глобальными моделям климата. В работах, в которых, объектом исследования Центральноазиатский регион (Malsy et al., 2012; 2013) и, в частности, бассейн р. Хараа, одного из притоков р. Селенги (см. Menzel et al., 2008), прогнозируют увеличение стока к концу XXI века. Ансамблевые эксперименты с глобальными моделями климата с помощью глобальной гидрологической модели для всего бассейна дают незначительное увеличение температуры воздуха и осадков к концу XXI века (Törnqvist et al., 2014). В работах (Batima, 2006; Морейдо и Калугин, 2017; Karthe et al., 2017) прогнозируется продолжение тенденции к снижению стока р. Селенги в XXI веке.

В **главе 2** описана разработка модели формирования стока в бассейне р. Селенги на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG, созданного вед.н.с. ИВП РАН Мотовиловым Ю.Г. (Motovilov et al., 1999, Мотовилов, 2016а,б).

В **разделе 2.1** описаны общая структура модели, основные расчетные уравнения и требования к исходным данным.

**Раздел 2.2** делится на три подраздела.

В первом подразделе дано описание созданного в ходе исследований архива данных для информационного обеспечения модели формирования стока р. Селенги. Построение модельной речной сети и элементарных водосборов выполнялось с использованием цифровой модели рельефа HYDRO1k (разрешение 1x1 км) (Lehner et al., 2008). Гидрофизические характеристики почв задавались на основе базы данных Harmonized World Soil Database (HWSD) (FAO, 2012), карт типов почв из Экологического атласа бассейна оз. Байкала и из Национального атласа Монголии. Характеристики землепользования задавались по ландшафтной базе Global Land Cover Characterization (GLCC) (Loveland et al., 2000).

Во втором подразделе описана методика схематизации бассейна р. Селенги и оценка параметров модели формирования речного стока по указанным базам данных. В качестве граничных условий в модели использовались данные о среднесуточных значениях интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, измеренных на 74 метеорологических станциях (20 из которых приходится на монгольскую часть бассейна), за 2000-2013 гг., а также данные метеорологического реанализа EWMF с пространственным разрешением  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  (Frieler et al., 2017) (495 узлов расчетной сетки на водосборе р. Селенги) за период 1980-2013 гг.

В третьем подразделе описаны результаты калибровки и проверки модели по данным о речном стоке в различных створах речной сети. Калибровка параметров проводилась по данным о среднесуточных расходах воды для маловодного периода за 2000-2013 гг. на четырех створах, находящихся на основном русле реки (один из них находится на территории Монголии – с. Зуунбурен, см. Таблицу 1). В качестве входных данных использовались фактические данные, измеренные на метеорологических станциях.

Получены удовлетворительные результаты расчета многолетних гидрографов среднесуточного и среднемесячного стока с использованием обоих видов входных метеорологических данных (качество моделирования среднесуточного стока оценивалось по критериям Нэша-Сатклиффа (NSE) и относительной систематической погрешности (BIAS), среднемесячного стока – по коэффициенту детерминации  $R^2$ ). При этом по данным метеорологического реанализа точность расчетов оказалась выше. Проверка модели на независимом материале проводилась за периоды с 2000 по 2013 гг. и с 1986 по 1999 гг.; в качестве граничных условий использовались данные метеорологического реанализа EWMEM1. На рисунке 1 представлены фактические и рассчитанные суточные гидрографы, полученные по фактическим данным, измеренным на метеорологических станциях и по данным метеорологического реанализа EWMEM1 для замыкающего створа р. Селенги с. Кабанск за калибровочный период.

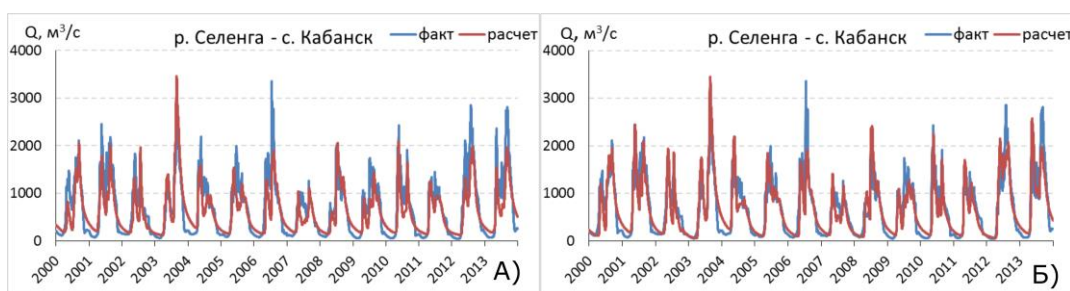


Рисунок 1. Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений (А) и реанализа (Б) суточные гидрографы р. Селенги в створе с. Кабанск

При переходе от калибровочного периода к проверочному критерию качества по четырем створам мало изменились, что может рассматриваться как необходимое условие робастности модели. Результаты оценки качества моделирования за калибровочный и проверочный периоды представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения критерия эффективности расчета суточного и месячного стока в бассейне р. Селенги по данным наблюдений и метеорологического реанализа EWEMBI

Гидрометрический створ	Площадь, км <sup>2</sup>	Данные наблюдений			Данные реанализа EWEMBI						
		Период калибровки 2000-2013 гг.			Период Верификации						
		2000-2013 гг.		1986-1999 гг.		2000-2013 гг.		1986-1999 гг.			
		сутки	месяц		сутки	месяц		сутки	месяц		
		<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> , %	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> , %	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>NSE</i>	<i>BIAS</i> , %	<i>R</i> <sup>2</sup>	
р. Селенга – с. Кабанск	445000	0.77	8.42	0.82	0.81	0.22	0.85	0.81	3.5	0.85	
р. Селенга – рзд. Мостовой	440000	0.78	1.65	0.78	0.78	-0.18	0.83	0.80	0.91	0.84	
р. Селенга – с. Новоселенгинск	360000	0.73	7.99	0.82	0.80	0.47	0.84	0.81	0.7	0.85	
р. Селенга – с. Зуунбурен	148000	0.63	-15.3	0.72	0.66	3.3	0.71	0.61	-15.0	0.68	

Были оценены возможности модели по воспроизведению тенденции уменьшения стока р. Селенги, проявляющейся в последние десятилетия. На рисунке 2 сопоставлены тренды наблюдаемых и смоделированных последовательностей среднегодовых расходов воды за 34 года (1980-2013 гг.).

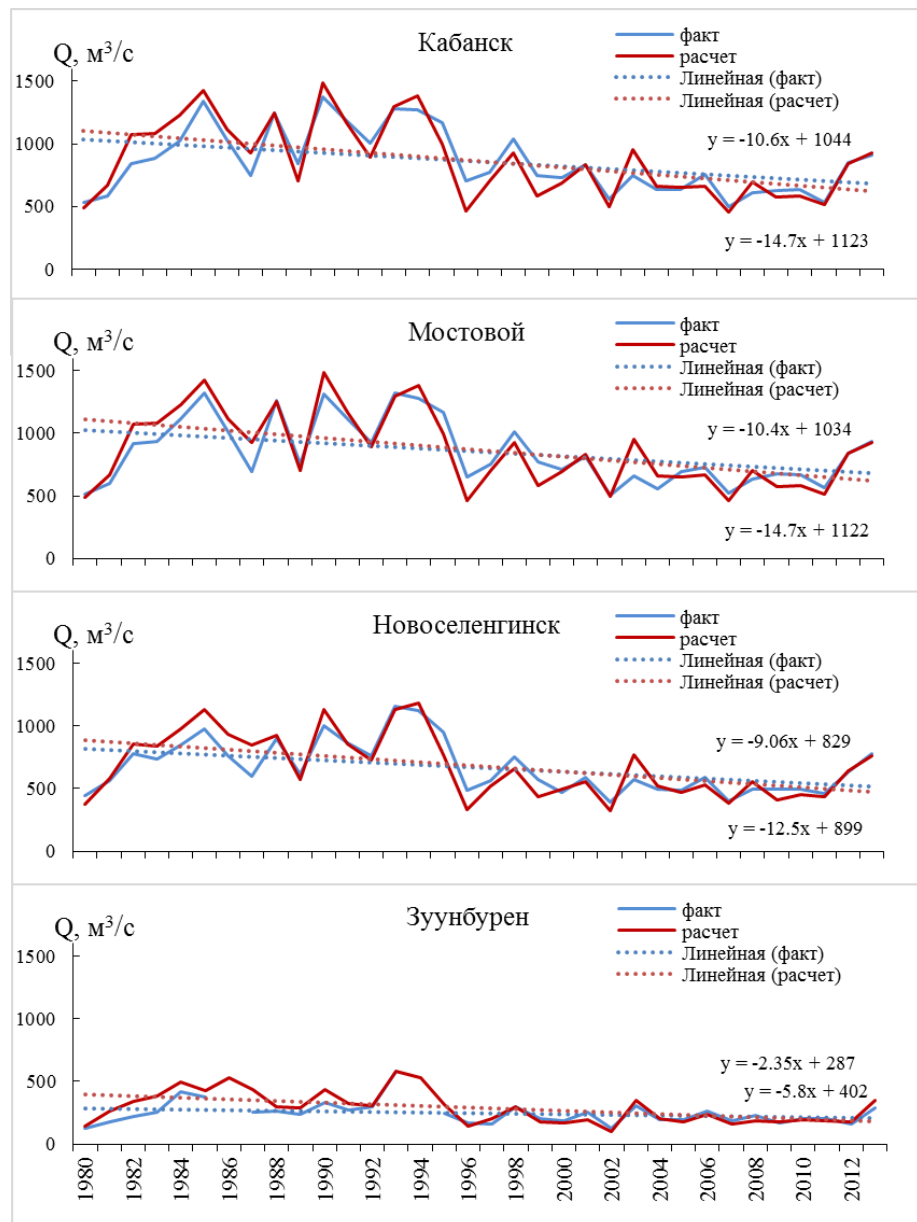


Рисунок 2. Фактические и рассчитанные годовые гидрографы в различных створах р. Селенги за 1980-2013 гг.

Помимо трендов годового стока, нами были сопоставлены тренды в рядах фактических и рассчитанных средних за сезон расходов воды. Результаты сопоставления представлены в таблице 2.

Как видно из рисунка 2 и таблицы 2, модель позволила воспроизвести многолетнюю тенденцию уменьшения годового стока во всех рассматриваемых створах р. Селенги. При этом модель завысила скорость происходящих изменений. В среднем по 4-м створам скорость снижения годового стока по данным наблюдений за период 1980-2013 гг. составила около  $80 \text{ м}^3/\text{с}$  за десятилетие, а по рассчитанным данным – порядка  $120 \text{ м}^3/\text{с}$  за десятилетие.

Таблица 2. Уклоны ( $\text{м}^3/\text{с}$  в год) линий тренда в наблюдаемых и рассчитанных последовательностях среднегодовых и среднесезонных расходов воды р. Селенги

Створ	Год		Весеннее половодье		Летний паводок		Осенний паводок		Зимняя межень	
	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.	Факт.	Расч.
Кабанск	-10.6	-14.7	-7.11	-1.31	-28.3	-24.5	-22.3	-35.7	-0.53	-9.47
Новоселенгинск	-9.06	-12.5	-7.01	-1.92	-21.9	-24.6	-17.9	-28.7	-0.28	-8.09
Мостовой	-10.4	-14.7	-1.28	-5.11	-29	-24.6	-22.5	-35.6	-1.12	-9.45
Зуунбурен	-2.35	-5.77	-1.22	-0.25	-5.81	-7.74	-5.49	-13	-0.89	-5.04
<b>Средний уклон</b>	<b>-8.11</b>	<b>-11.9</b>	<b>-4.16</b>	<b>-2.15</b>	<b>-21.2</b>	<b>-20.4</b>	<b>-17.0</b>	<b>-28.2</b>	<b>-0.71</b>	<b>-8.01</b>

По данным наблюдений с наибольшей скоростью происходит снижение летнего и осеннего стока, с наименьшей – весеннего и зимнего стока, что подтверждается расчетами по модели (Таблица 2). Кроме того, как по данным наблюдений, так и по расчетам, годовой и сезонный сток в створах нижней Селенги уменьшается быстрее, чем на средней Селенге. Наибольшая по сравнению с другими сезонами скорость снижения летнего стока воспроизводится моделью с хорошей точностью: как для наблюдаемых, так и для рассчитанных рядов стока, она составила, в среднем, порядка  $200\text{-}210 \text{ м}^3/\text{с}$  за десятилетие. Снижение летнего стока вносит наибольший вклад в снижение годового стока р. Селенги (Фролова и др., 2017). Вместе с тем, скорости снижения рассчитанных величин стока за другие сезоны оказались, в большинстве случаев, завышенными по сравнению с фактическими величинами. Наибольшие относительные погрешности в расчете скорости снижения стока получились для зимнего и весеннего сезонов, что в определенной степени объясняется очень небольшими абсолютными величинами наклона тренда для этих сезонов.

В разделе 2.3 описана процедура оценки робастности модели формирования стока р. Селенги по отношению к изменению климатических параметров, предложенная нами в работе (Gelfan and Millionshchikova, 2018). Алгоритм расчетов заключается в следующем. По данным реанализа EWMБI за период 1980-2013 гг. выделялись четыре календарные выборки данных, контрастных по метеорологическим характеристикам. В каждую выборку отбирались года, в которых среднее значение температуры воздуха и сумма осадков были больше (или меньше) соответствующих среднемноголетних значений, т.е. формировалась выборка из «теплых» и «влажных» лет, выборка из «холодных» и «влажных» лет и т.д. По результатам расчета гидрографов среднесуточного стока с помощью модели (см. предыдущий раздел) для каждой выборки оценивался критерий качества расчетов  $\text{NSE}$ :  $\text{NSE}_1$  – для «теплых» и «влажных» лет;  $\text{NSE}_2$  – для «холодных» и «влажных» лет,  $\text{NSE}_3$  – для «теплых» и «сухих» лет; и  $\text{NSE}_4$  – для «холодных» и «сухих» лет.

лет. Гидрологическая модель считается робастной и, соответственно, может быть использована для оценки гидрологических последствий изменений климата, если принимается нулевая гипотеза  $NSE_i = NSE_j$  для всех  $(i, j = 1, \dots, 4; i > j)$ .

Нулевая гипотеза принимается при уровне значимости  $\alpha$ , если выполняется неравенство:

$$\Phi(Z_{ij}) < 1 - \alpha / 2, \quad (1)$$

где  $\Phi(x)$  - интегральная функция распределения стандартного нормального

распределения,  $Z_{ij} = \frac{|NSE_i - NSE_j|}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}}$ ,  $i, j = 1, \dots, 4; i > j$ ,  $\sigma^2$  - выборочная дисперсия

соответствующей оценки NSE.

В диссертации дан вывод формулы для оценки выборочной дисперсии критерия Нэша-Сатклиффа  $\sigma_{NSE}^2$ :

$$\sigma_{NSE}^2 = \frac{4}{N} \left[ (\rho - \alpha)^2 \alpha^2 + N \alpha^2 \left( \frac{1 - \rho^2}{N - 2} \right) + \beta^2 (\alpha^2 + \beta^2 + 1) \right], \quad (2)$$

где  $\rho$  - коэффициент корреляции Пирсона между смоделированным и фактическим расходами;  $\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_f}$ ,  $\sigma_s$ , и  $\sigma_f$  - среднеквадратическая ошибка ряда смоделированных и

фактических расходов, соответственно;  $\beta = \frac{\mu_s - \mu_f}{\sigma_f}$ ;  $\mu_s$  и  $\mu_f$  - математическое ожидание

ряда смоделированных и фактических расходов, соответственно;  $N$  - длина выборки.

Формула (2) получена нами с использованием зависимости критерия NSE от статистических характеристик фактического и рассчитанного рядов стока, полученной в работе (Murphy, 1988), и разложения этой зависимости в ряд Тейлора в окрестности математических ожиданий соответствующих характеристик. При этом делается предположение, что выборочные оценки статистических характеристик имеют нормальное распределение.

В результате формулируется следующее условие робастности модели по отношению к изменению климатических параметров: модель робастна тогда и только тогда, когда условие (1) выполняется для всех  $Z_{ij}$   $i, j = 1, \dots, 4; i > j$ , т.е. когда различия между критериями NSE полученными для климатически контрастных периодов статистически не значимы (при выбранном уровне значимости).

Результаты расчетов показали, что модель успешно «прошла» разработанный тест для среднемесячных и среднегодовых расходов воды во всех 4-х рассматриваемых створах р. Селенги при уровне значимости  $\alpha = 5\%$ . Иными словами, модель показала

статистически близкие результаты расчета измеренных и рассчитанных расходов воды указанного временного разрешения для климатически контрастных периодов. Для гидрографов среднесуточного стока различия между критериями NSE оказались статистически значимы. Причиной этого является малая выборочная дисперсия значений NSE, которая, в свою очередь, обусловлена большим размером выборки для расходов суточного разрешения.

Таким образом, предложенный нами тест показал, что разработанная модель формирования стока в бассейне р. Селенги робастна по отношению к изменению климатических параметров и может быть использована для оценки влияния изменений климата на годовой и месячный сток в разных частях бассейна.

**Глава 3** посвящена анализу чувствительности характеристик годового и максимального стока р. Селенги к изменениям климатических параметров с помощью разработанной модели формирования речного стока. Для количественной оценки чувствительности применен метод линейной трансформации временных рядов фактических метеорологических данных (далее “DC-метод”).

В **разделе 3.1** описана процедура оценки чувствительности с помощью DC-метода. Суть процедуры – в построении искусственных рядов метеорологических переменных путем внесения в соответствующие наблюдаемые метеорологические ряды малых постоянных возмущений, которые соответствуют возможным (прогнозируемым) изменениям климатических норм, и оценке с помощью гидрологической модели аномалий характеристик стока, обусловленных этими возмущениями (см., например, Gelfan et al., 2017). Численные эксперименты проводились для различных сочетаний изменений нормы температуры воздуха (на 0°C; 0.5°C; +1°C; 1.5°C; +2°C; +3°C) и осадков (на -10%; -5%; 0%; +5%; +10%). В результате получилось 30 сочетаний (сценариев) возможных изменений климатических параметров. По рассчитанным для каждого сценария гидрографам стока определялись 30 среднемноголетних значений характеристик водного режима р. Селенги, для которых затем проводился анализ их чувствительности к задаваемым изменениям климатических параметров. Анализ чувствительности выполнялся для аномалий среднемноголетних значений и показателей вариации годового и максимального стока.

**Разделы 3.2-3.3** посвящены анализу результатов оценки чувствительности стока к изменению климатических норм осадков и температуры воздуха.

Результаты численных экспериментов представлены в таблице 3. Показано, что при неизменной норме осадков увеличение средней по бассейну нормы температуры воздуха на 1°C приводит к уменьшению рассчитанной по модели среднемноголетней нормы

годового стока р. Селенги на ~10%, а нормы максимального за год расхода воды - на 8%. Среднеквадратическое отклонение рассчитанной по модели нормы годового стока при этом уменьшится на ~8%, а нормы максимального стока – 5%. Причина такого уменьшения – рост рассчитанного испарения с поверхности бассейна. Увеличение средней по бассейну суммы осадков на 10% при неизменной норме температуры воздуха приводит к соответствующему увеличению рассчитанной по модели нормы годового стока р. Селенги на 21%, а нормы максимального стока – на 18%, т.е. изменения стока превышают изменения осадков в 2 раза. Непропорциональный рост стока по отношению к росту осадков может быть связан с дополнительным увлажнением бассейна, снижением потерь стока на инфильтрацию в почву и увеличением коэффициента стока. Среднеквадратическое отклонение рассчитанного по модели годового стока при этом увеличивается на ~19%, а максимального – на 17%.

Таблица 3 Оценки чувствительности характеристик норм годового и максимального стока к изменению климатических норм температуры воздуха и осадков.

Показатель		Коэффициенты чувствительности характеристики стока	
		К изменению нормы температуры воздуха, %/(град)	К изменению нормы осадков, %/(10%)
Годовой сток	Среднее	-10.4	21
	Стандартное отклонение	-8.3	19
	Коэффициент вариации	2.95	-3.5
Максимальный за год расход воды	Среднее	-8.2	18
	Стандартное отклонение	-5.3	17
	Коэффициент вариации	3.9	-2.3

Таким образом, численные эксперименты показали, что возможный рост среднесноголетней нормы осадков и/или температуры воздуха может увеличить не только норму, но и дисперсию характеристик речного стока, что может привести к росту частоты экстремальных гидрологических явлений при увеличении нормы осадков в бассейне р. Селенги.

В разделе 3.4 анализируются изменения внутригодового распределения стока р. Селенги вследствие изменения климатических параметров. Были построены среднесноголетние (типовые) гидрографы по искусственным сценариям, которые



сравнивались со среднемноголетним расчетным гидрографом за 1986-2013 гг. при исходных метеорологических данных (Рисунок 3).

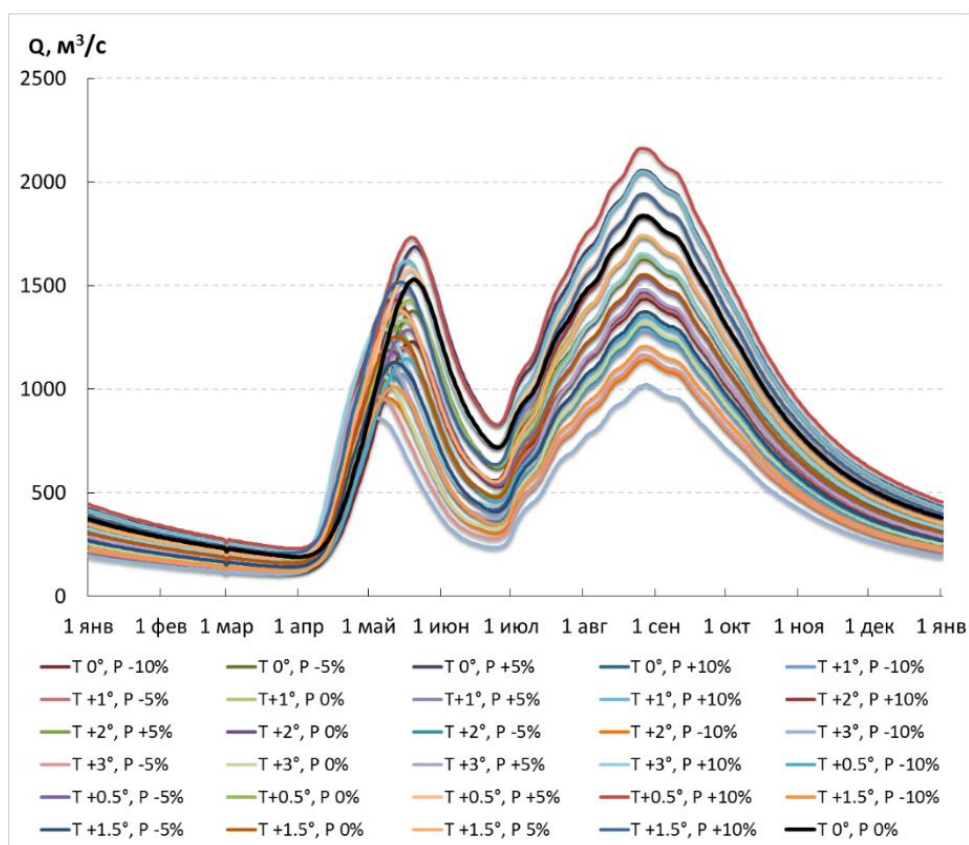


Рисунок 3. Чувствительность рассчитанных среднемноголетних гидрографов р. Селенги в створе с. Кабанск к возможным изменениям средних по бассейну климатических норм осадков и температуры воздуха

Анализ среднемноголетних гидрографов р. Селенги показал, что изменения климатической нормы температуры воздуха меняют не только амплитуду пиков, но и среднее время их наступления. Так, с увеличением среднегодовой температуры воздуха начало и пик половодья смещается на более ранние даты (примерно на 16 дней). Потепление также способствует значительному снижению пиковых расходов воды дождевых паводков.

**Глава 4** посвящена оценке возможных многолетних изменений стока р. Селенги в XXI веке на основе численных экспериментов с гидрологической и глобальными климатическими моделями, результаты которых частично нами описаны в статье (Chalov et al., 2018).

В разделе 4.1 проанализированы возможности расчета многолетних характеристик речного стока р. Селенги за период наблюдений по метеорологическим данным, рассчитанным с помощью глобальных моделей климата (GCMs – Global Climate Model). Были использованы данные, полученные нами в рамках выполнения международного проекта ISI-MIP2 (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project Phase 2) совместно с

Потсдамским Институтом изучения климата (PIC, Германия). При выборе моделей климата важным условием было наличие данных по каждому из четырех RCP-сценариев увеличения концентрации парниковых газов в XXI веке, принятых Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). С учетом этого было отобрано четыре глобальные климатические модели: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, по которым были созданы базы метеорологических данных для бассейна р. Селенги.

Сопоставление метеорологических характеристик, рассчитанных по глобальным моделям климата, с данными реанализа EWEMBI показало, что имеются большие расхождения в сезонном ходе осадков и дефицита влажности воздуха. В связи с этим была применена процедура коррекции модельных данных, описанная в (Gelfan et al., 2015), которая позволила существенно улучшить описание указанных метеорологических характеристик и рассчитанных по ним величин речного стока (Рисунок 4).

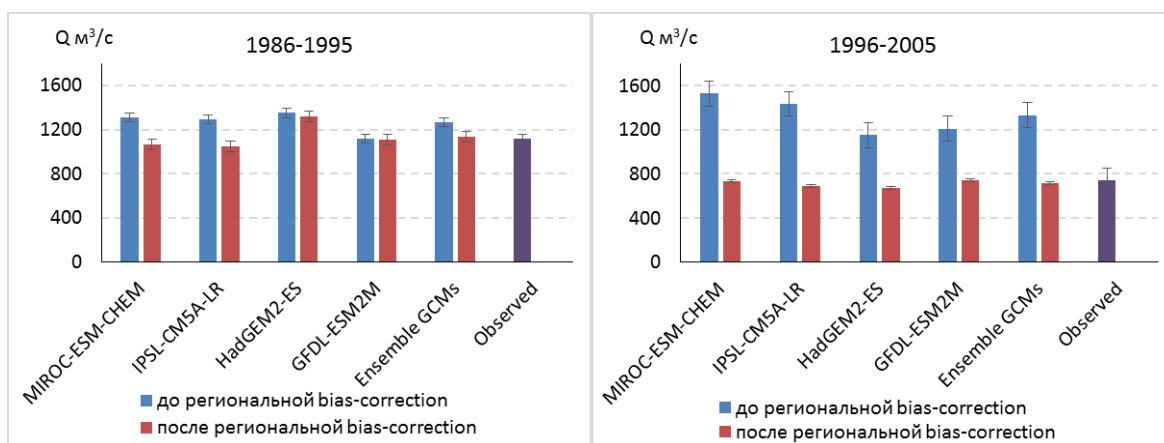


Рисунок 4. Рассчитанные величины среднегодового стока р. Селенги за 1986-1995 и 1996-2005 гг. по данным GCMs до и после их коррекции

В разделе 4.2 описываются процедура и результаты численных экспериментов, организованных для предвычисления гидрологических последствий изменения климата в бассейне р. Селенги в XXI веке с помощью разработанной модели формирования стока по данным ансамблевых расчетов глобальных моделей климата. Рассчитанные характеристики стока по трем тридцатилетним периодам XXI века (2010-2939, 2040-2069, 2070-2099 гг.) сравнивались с рассчитанными за исторические периоды, контрастные по гидрологическим характеристикам (1986-1995 гг. – многоводный период; 1996-2005 гг. – маловодный период), чтобы оценить влияние климатических изменений на среднемноголетний сток. На рисунке 5 представлены осредненные по ансамблю климатических моделей относительные аномалии годового стока р. Селенги в XXI веке для четырех сценариев антропогенного воздействия по отношению к двум историческим

периодам. Видно, что относительно многоводного периода (1986-1995 гг.) при сценариях RCP 2.6 и RCP 4.5 возможно увеличение стока на протяжении всего столетия до 8%. Относительно маловодного периода (1996-2005 гг.) при сценарии RCP 2.6 сток к середине XXI века практически не изменится, лишь за период 2070-2099 гг. ожидается сокращение стока на 2%. При сценарии RCP 4.5 в начале XXI века ожидается увеличение стока на 2%, а затем сток уменьшается, вплоть до -5% к концу XXI века. При остальных сценариях (RCP 6.0 и RCP 8.5) ожидается сокращение стока на протяжении всего столетия до 4-19% по сравнению с многоводным периодом (1986-1995 гг.) и до 10-25% по сравнению с маловодным периодом (1996-2005 гг.).

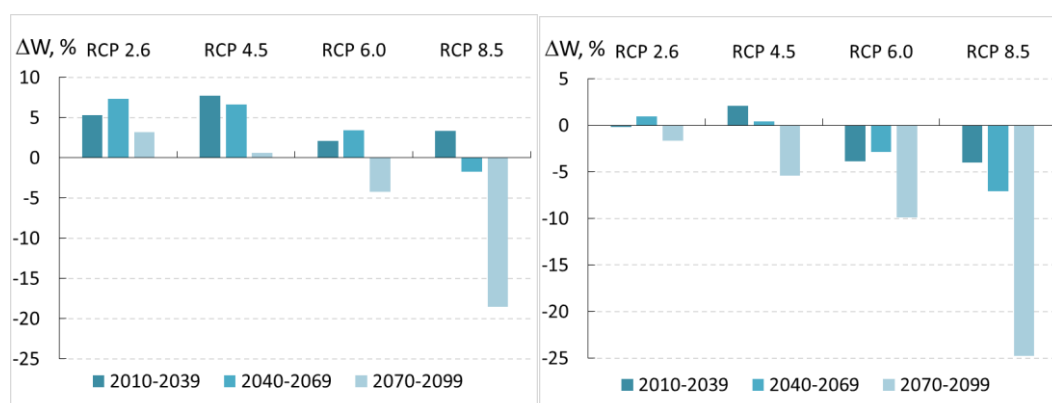


Рисунок 5. Осредненное по 30-ти летним периодам среднее по ансамблю GCMs изменение стока р. Селенги в XXI веке, рассчитанное при различных RCP-сценариях по отношению к стоку за многоводный (слева) и маловодный (справа) периоды

В разделе 4.3 анализируется неопределенность полученных оценок возможных изменений стока р. Селенги в XXI веке, обусловленная «сценарной» и «модельной» неопределенностями климатических проекций (Hawkins and Sutton, 2009). «Сценарная» неопределенность связана с изменчивостью сценариев радиационных воздействий, «модельная» обусловлена различиями в структуре моделей климата и является причиной различий климатических проекций даже при использовании одинаковых сценариев радиационного форсинга, т. е. при гипотетическом отсутствии сценарной неопределенности.

Вклад того или иного источника неопределенности указанных расчетных оценок изменений водного режима определялась на основе дисперсионного анализа ANOVA (Hattermann et al., 2018), позволяющий учесть вклад отдельных факторов в суммарную дисперсию искомой характеристики (для рассматриваемого нами случая двух факторов).

На рисунке 6 представлены результаты расчетов. Видно, что вклад «модельной» неопределенности намного выше вклада «сценарной» неопределенности, причем последний начинает нарастать к концу XXI века. Этот результат вполне ожидаем, т.к. с увеличением заблаговременности вырастает неопределенность прогнозов экономического

и технологического глобального развития, на которых построены сценарии изменения концентраций парниковых газов и аэрозолей и, следовательно, сценарии радиационных воздействий.

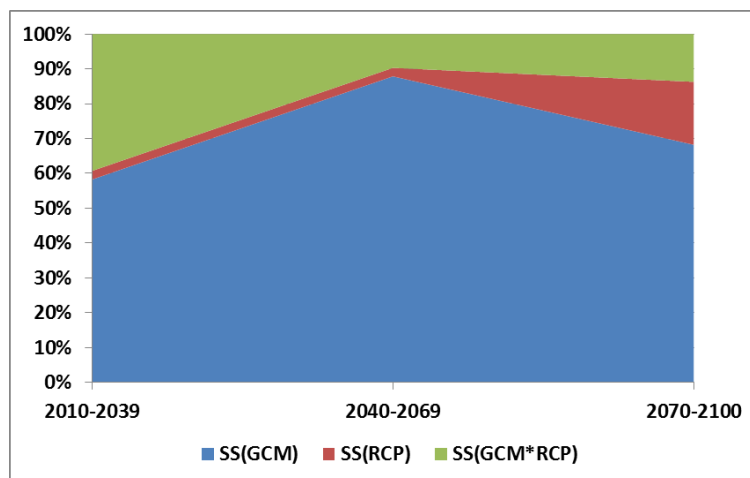


Рисунок 6. Изменение доли (в %) модельной (синее поле), сценарной (красное поле) и взаимной (зеленое поле) неопределенностей в общую дисперсию рассчитанных аномалий годового стока р. Селенги в XXI веке по отношению к маловодному периоду (1996-2005 гг.)

**Раздел 4.4** посвящен анализу чувствительности годового р. Селенги к изменению климатических параметров по данным глобальных моделей климата. По схеме DC-метода, аналогичной описанной в разделе 3.1, нами был проведен локальный анализ чувствительности аномалии нормы годового стока бассейна р. Селенги (относительно норм базовых периодов 1986–1995 и 1996-2005 гг.), усредненный по ансамблю GCMs. Анализ показал, что увеличение средней по бассейну нормы температуры воздуха  $\Delta T$  на  $1^\circ\text{C}$  (при неизменной норме осадков) приводит к уменьшению рассчитанного по модели среднемноголетнего годового стока р. Селенги на  $\sim 8\%$ . средней по бассейну суммы осадков  $\Delta P$  на  $10\%$  (при неизменной норме температуры воздуха) приводит к соответствующему изменению рассчитанной по модели среднемноголетнего годового стока р. Селенги на  $21\%$ , т.е. изменения стока превышают изменения осадков более чем в 2 раза. Таким образом, оценки чувствительности стока р. Селенги по данным расчетов моделей климата оказались близки к результатам оценки чувствительности стока по данным наблюдений (см. Таблицу 3). Полученный результат позволил сделать следующий вывод: два набора искусственных сценариев климата (первый - построенный путем линейной трансформации наблюдаемых рядов и второй - рассчитанный по глобальным климатическим моделям) оказались близкими, если сравнивать их по среднемноголетнему отклику гидрологической системы бассейна р. Селенги. При этом важно подчеркнуть, что первые сценарии характеризуются существенно меньшей неопределенностью, т.к. в них, в

отличие от вторых сценариев, не содержится неопределенностей, связанных с расчетами по GCMs. Полученный результат означает также, что норма годового стока намного более чувствительна к изменению климатических норм, чем к изменениям других статистических характеристик временных рядов, воспроизводимых глобальными моделями климата.

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

1. Разработана физико-математическая модель формирования стока для всего бассейна р. Селенги, позволяющая воспроизводить динамику пространственного распределения гидрологических переменных с высоким пространственным (порядка 600-700 км<sup>2</sup>) и временным (сутки) разрешением по данным метеорологического реанализа за многолетний период. С помощью модели воспроизведены современные тенденции изменения водности рек исследуемого бассейна, включая выдающееся маловодье последних десятилетий.
2. Разработана процедура тестирования модели, оценивающая возможности ее использования для экстраполяционных задач расчета гидрологических последствий изменения климата. Процедура включает количественную оценку робастности модели, построенную на статистическом анализе изменчивости критерия ее эффективности, рассчитанного для климатически контрастных периодов. Показано, что модель формирования стока в бассейне р. Селенги мало чувствительна (робастна) к изменению климатических параметров и может быть использована для оценки влияния изменений климата на годовой и месячный сток в разных частях бассейна.
3. На основе разработанной модели формирования стока проведен анализ чувствительности гидрологической системы бассейна р. Селенги к изменению климатических параметров с использованием метеорологических данных за исторический период. Численные эксперименты показали, что:
  - (1) при увеличении нормы температуры на 1°C (при неизменной норме осадков) норма стока р. Селенги снижается на 8-10%, а при росте нормы осадков на 10% (при неизменной норме температуры воздуха) норма стока растет более чем на 20%. Отсюда сделан вывод, что основной вклад в наблюдаемое в 1996-2013-х годах 30%-е уменьшение водности р. Селенги (по сравнению с многоводным периодом 1983-1995 гг.) внесло произошедшее за этот период 10%-е уменьшение осадков. Влияние роста испарения вследствие увеличения температуры воздуха на 0.4°C оказалось менее значимым;
  - (2) возможный рост среднегодовой нормы осадков может увеличить не только норму, но и дисперсию годового стока. Обнаруженный эффект, в частности, может привести к

росту частоты экстремальных гидрологических явлений при увеличении нормы осадков в бассейне р. Селенги.

4. Исследованы и апробированы возможности региональной модели формирования стока для оценки многолетних изменений стока р. Селенги за период наблюдений с использованием в качестве входных данных результатов ансамблевых расчетов глобальных климатических моделей. С помощью разработанной гидрологической модели бассейна р. Селенги получены результаты предвычисления многолетних изменений характеристик стока в XXI веке с использованием ансамблей климатических проекций, рассчитанных по данным глобальных климатических моделей при разных сценариях антропогенного воздействия. В случае реализации сценариев RCP 6.0 и RCP 8.5 к концу XXI века может произойти сокращение стока на 4-19% по сравнению с многоводным периодом (1986-1995 гг.) и на 10-25% по сравнению с маловодным периодом (1996-2005 гг.).

5. Расчетные аномалии нормы годового стока р. Селенги в XXI веке характеризуются значительной неопределенностью, которая связана, прежде всего, с неопределенностью данных о климатических проекциях, рассчитанных с помощью глобальных моделей климата. Модельная неопределенность (различия между моделями климата) вносит существенно больший вклад в общую дисперсию расчетных аномалий, чем сценарная неопределенность (изменчивость RCP-сценариев).

6. Норма годового стока р. Селенги одинаково чувствительна к изменению норм осадков и температуры воздуха при использовании на входе гидрологической модели двух наборов проекций климата в XXI в.: (1) заданных путем линейной трансформации фактических рядов наблюдений (DC-метод) без использования моделей климата; (2) заданных по данным моделей климата. При этом первый набор данных характеризуется существенно меньшей неопределенностью, т.к. в нем, в отличие от 2-го набора, не содержится неопределенностей, связанных с расчетами по глобальным климатическим моделям. Использование климатических проекций, построенных с помощью DC-метода, создает возможность получения более устойчивых оценок гидрологических последствий изменения климата в бассейне р. Селенги с помощью региональной гидрологической модели.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Gelfan, A. N., and **Millionshchikova, T. D.** Validation of a Hydrological Model Intended for Impact Study: Problem Statement and Solution Example for Selenga River Basin // *Water Resour.*, – 2018. – Vol. 45. Suppl. 1, – P. S90–S910.
2. Chalov S. R., **Millionshchikova T. D.** and Moreido V.M. Multi-model approach to quantify future sediment and pollutant loads and ecosystem change in Selenga River system // *Water Resour.*, – 2018. – Vol. 45. Suppl. 2. – P. S22–S34.

*Публикации в других изданиях:*

3. **Millionshchikova T.** Hydrological model-based assessment of Selenga basin runoff sensitivity in the XXI century. Proceedings of school for Young Scientists “Modelling and forecasting of river flows and managing hydrological risks: towards a new generation of methods” Moscow, Russia, 22-26 October, 2018, p.34.
4. Moreido V, Chalov S. and **Millionshchikova T.** Application of hydrological modelling to seasonal and long-term projections of the Baikal omul (*Coregonus migratorius*) spawning migration extent in the Selenga river. Book of Abstracts GMIT Symposium on Environmental Science and Engineering. 31 August – 2 September 2018, Nalaikh, Mongolia. Pp. 74-75.
5. **Millionshchikova T.** Hydrological model-based assessment of runoff sensitivity to climate change in the Selenga basin. Book of Abstracts GMIT Symposium on Environmental Science and Engineering. 31 August – 2 September 2018, Nalaikh, Mongolia. Pp. 78.
6. **Millionshchikova T.** Selenga river runoff projections in the XXI century: ECOMAG-based simulation results. Book of Abstracts. The Second International Young Scientists Forum on Soil and Water Conservation and ICCE symposium 2018 "Climate Change Impacts on Sediment Dynamics: Measurement, Modelling and Management". 27-31 august. Moscow, Russia. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.
7. Gelfan A., Kalugin A., **Millionschikova T.**, Motovilov Yu. Do changes in climatic norms influence on runoff variability? Data-based and model-based results. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-8735, EGU General Assembly 2018.
8. Moreido V., Kalugin A., Motovilov Y., and **Millionshchikova T.** Assessing inflow alterations into Lake Baikal from Selenga river basin with respect to changing climate and land use conditions. Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-7610, EGU General Assembly 2017.