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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
д.ф.-.м.н. Гельфан А.Н.

Москва – 2019

Оглавление

Введение 4

Глава 1. Изменения климата и речного стока в бассейне р. Селенги: обзор существующих оценок по данным наблюдений и результатам моделирования 9

1.1 Физико-географическая, климатическая и гидрологическая характеристики бассейна р. Селенги 9

1.1.1 Физико-географическая характеристика 9

1.1.2 Климатическая характеристика 11

1.1.3 Гидрологическая характеристика 13

1.2 Обзор существующих оценок многолетних изменений климата и речного стокав бассейне р. Селенги по данным наблюдений 15

1.2.1 Оценки многолетних изменений регионального климата 15

1.2.2 Оценки многолетних изменений водного режима 18

1.3 Обзор существующих методов моделирования речного стока и возможных изменений водного режима в бассейне р. Селенги 22

Глава 2. Разработка модели формирования стока в бассейне р. Селенги: описание, результаты испытаний, оценка робастности 27

2.1 Описание структуры модели и требований к исходным данным 27

2.2 Оценка параметров, калибровка и проверка модели по данным наблюдений за характеристиками водного режима в различных створах речной сети 34

2.2.1 Создание баз исходной информации для модели формирования стока в бассейне р. Селенги 34

2.2.2 Схематизация бассейна р. Селенги и оценка параметров модели формирования речного стока 38

2.2.3 Калибровка и проверка модели по данным о речном стоке в различных створах речной сети 41

2.3 Оценка робастности модели формирования стока р. Селенги по отношению к изменению климатических параметров 55

2.3.1 Постановка задачи 55

2.3.2 Процедура оценки робастности 56

2.3.3 Результаты оценки робастности 58

Глава 3. Анализ чувствительности гидрологической системы бассейна р. Селенги к изменению климатических параметров с использованием метеорологических данных за исторический период 61

3.1 Процедура оценки чувствительности 62

3.2 Оценка чувствительности среднего значения и показателей вариации годового стока к изменению климатических норм осадков и температуры воздуха 65

3.3 Оценка чувствительности среднего значения и показателей вариации максимального стока к изменению климатических норм осадков и температуры воздуха.....69

3.4 Анализ изменений внутригодового распределения стока вследствие изменения климатических параметров 79

Глава 4. Предвычисление возможных многолетних изменений стока р. Селенги в XXI веке на основе численных экспериментов с гидрологической и глобальными климатическими моделями 81

4.1 Моделирование стока р. Селенги за исторический период при использовании данных расчетов по глобальным моделям климата 81

4.2 Оценки возможных изменений климата и водного режима в бассейне р. Селенги в XXI веке по данным расчетов глобальных моделей климата.....94

4.2.1 Возможные изменения климата по данным климатических моделей.....94

4.2.2 Предвычисление возможных изменений водного режима в XXI веке 99

4.3 Анализ неопределённости расчетных оценок возможных изменений стока р. Селенги в XXI веке 106

4.4 Анализ чувствительности среднего годового стока р. Селенги к изменению климатических параметров по данным глобальных моделей климата.....109

Заключение.....112

Список литературы.....114

Приложение А.....128

Приложение Б. 132

Введение

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^2) – 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) ECOMAG [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 ECOMAG (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°C оказалось менее значимым.
4. Возможный рост среднемноголетней 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 ECOMAG, 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 ECOMAG 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.

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

1.1 Физико-географическая, климатическая и гидрологическая характеристики бассейна р. Селенги

1.1.1 Физико-географическая характеристика

Селенга – крупнейшая река, впадающая в оз. Байкал и обеспечивающая до половины ежегодного притока воды в озеро Байкал [Гармаев и Христофоров, 2010], которое в свою очередь является крупнейшим природным резервуаром пресной воды и входит в Список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Река Селенга образуется слиянием р. Идэр и р. Мурэн на территории Монголии, затем течет в северо-восточном направлении, после чего меняет направление на северное и после впадения р. Орхон, пересекает границу России. Длина реки 1024 км, их которых 409 км нижнего течения в пределах России. Площадь бассейна 447 тыс. км^2, из которых 299 тыс. км^2 в Монголии (66%), 148 тыс. км^2 в России (34%). Средний уклон 0,34 ‰. Водосборный бассейн р. Селенги составляет 83,4% от водосборного бассейна оз. Байкал [Потемкина, 2004]. Карта-схема бассейна р. Селенги представлена на рисунке 1.1.

Рисунок 1.1. Обзорная физико-географическая карта территории исследования

При впадении в оз. Байкал образует крупнейшую в мире пресноводную дельту, которая представляет собой заболоченную аллювиально-дельтовую равнину с большим количеством проток, стариц и пойменных озер, площадь которой по данным различных исследователей составляет от 560 до 1200 км^2 [Иванов и др., 2007; Корытный и др., 2012; Ильичева и др., 2014].

Средняя густота речной сети по бассейну р. Селенги составляет от 0,15 км/км^2 в пределах Монголии и до 0,47 км/км^2 в пределах России. Основные притоки: Эгийн-Гол, Джида, Темник – слева; Орхон, Чикой, Хилок, Уда – справа (Табл.1.1).

Таблица 1.1. Гидрографическая характеристика основных притоков р. Селенги

Название реки	Длина, км	Площадь водосбора, км
на территории Монголии		
Идэр	452	24555
Дэлгэрмурэн	445	26640
Эг	535	42400
Орхон	1124	132000
Туул	704	50400
Хараа	340	15000
Ероо	320	11800
на территории России		
Джида	567	23500
Темник	314	5480
Чикой, всего	769	46200
в т.ч.: по Бурятии	260	10200
по Забайкальскому краю	509	36000
Хилок, всего	840	38500
в т.ч.: по Бурятии	200	10850
по Забайкальскому краю	640	27650
Уда	467	34800

Бассейн Селенги имеет хорошо развитую речную сеть общей длиной 53 тыс. км [Экосистемы…, 2005]. На территории Монголии Селенга степная полугорная река с низкими берегами, неустойчивым галечным руслом, разветвленным на многочисленные рукава. Далее, пересекая горную область Селенгинской Даурии, вступает в пределы России, где река представляет собой уже чередование сужений и межгорных расширений, где русло широкопойменное, со сложными сопряженными разветвлениями и пойменной многорукавностью [Реки и озера мира, 2012].

На севере водораздел р. Селенги (российская часть) ограничен хребтами Хамар-Дабан и Улан-Бургасы, на северо-востоке - по слабо выраженному водоразделу верховьев рек Уды и Хилка и далее по Яблоновому хребту. На востоке водораздел продолжается по хребтам Хэнтэй-Чикойского нагорья: по горам верховьев р. Чикой, далее по Чикойскому хребту и уходит за пределы России в Монголию. Южная граница проходит по холмогорьям Северной Халхи. В пределах двух участков на западе – у оз. Тэлмэн-Далай-Нур и на востоке – у Арахлейских озер, водораздел практически не выражен вовсе.

Условия формирования стока чрезвычайно разнообразны. Большая площадь бассейна Селенги в совокупности со сложным рельефом территории (перепад высот – от 600 до 3000 м) обуславливают неоднородность и разнообразие физико-географических условий бассейна, что определяет довольно пестрый почвенный и растительный покровы региона [Беспалов, 1951; Предбайкалье и Забайкалье, 1965]. В системе природных зон бассейн Селенги располагается в таежной, лесостепной, степной и сухостепной зонах.

В горной части бассейна представлены дерновые лесные почвы на делювиальных сильно щебнистых суглинках. В межгорных котловинах участки более сухие и прогреваемые, поэтому здесь развиваются каштановые почвы, переходящие в горно-каштановые безгипсовые ближе к нижней части горных склонов южной экспозиции [Гынинова и др., 2012]. В межгорных депрессиях в среднем течении р. Хилок также преобладают каштановые почвы [Давыдова и Шагжиев, 2002]. На границе с ними сменяются на бескарбонатные или малокарбонатные разновидности черноземных почв. Черноземы обычно расположены в зоне высот от 800 до 1000. Выше черноземных почв встречаются серые лесные почвы. В горах распространены подзолистые иллювиально-железистые почвы. В условиях достаточного увлажнения вдоль речных долин встречаются аллювиальные луговые почвы, в которых преобладают супеси, пески и галечники. В слабо дренированных понижениях у подножий склонов представлены солончаки с солончаковатыми почвами [Убугунова и др., 1998], преимущественно по левобережью нижнего течения р. Джиды [Гидрологический режим рек…, 1977]. В поймах рек бассейна Селенги в основном встречаются болотные, луговые и дерновые почвы, в сухостепной зоне появляются гидроморфные солончаки [Севастьянов, 2009]. В южной части дельты р. Селенги, в верховьях Джиды и Темника, а также по днищам падей встречаются болотные мерзлотные почвы.

Широкая распространенность легких и хорошо дренируемых почв в сочетании с сухостью климата способствуют такому водного режиму почво-грунтов, который препятствует бурному развитию растительности. Поэтому на территории исследуемого бассейна преобладают почвы и растительность аридного типа.

Монгольская (южная) часть бассейна представлена степной растительностью, т.к. преобладает низкая влажность почв. Здесь охватывается большая часть горных районов страны (~57,5%), расположено 65% лесной степи и 13,6% степной зоны [National Atlas of Mongolia, 2009]. Северная (российская) часть характеризуется густой таежной растительностью и многолетней мерзлотой, которая является важным источником внутрипочвенных вод в летний период [Фролова и др., 2017]. В связи с преобладаем горного рельефа на территории бассейна хорошо проявляется высотная зональность, особенно в монгольской части бассейна, где котловины занимают сухие степи, а вершины гор – гольцовая растительность. На севере бассейна высотная зональность представлена только двумя зонами: горно-таежная и высокогорная.

1.1.2 Климатическая характеристика

Бассейн Селенги расположен в зоне резко континентального климата, характеризующийся большой амплитудой среднесуточных и сезонных температур

воздуха [Алисов, 1969] и неравномерным выпадением осадков в течение года, что и обуславливает разнообразие и контрастность ландшафтов.

Территория относится к наиболее засушливой части Центральной Азии. Суровая безветренная зима под воздействием сибирского антициклона сменяется поздней прохладной ветреной и сухой весной с ночными заморозками, удерживающимися до конца первой декады июня. Лето короткое, в первой половине засушливое, т.к. преобладает континентальная полярная воздушная масса. Во второй половине лета (июль-август) восточные и южные районы бассейна часто оказываются под воздействием тихоокеанских муссонов. Осень прохладная и сухая, с резкими суточными колебаниями температур и часто – с ранними заморозками. В горах континентальность климата несколько уменьшается, при этом значительно увеличивается увлажнение [Алибегова, 1985].

Термический режим территории очень разнообразен. Норма средней годовой температуры воздуха на всей территории бассейна р. Селенги имеет отрицательные значения, изменяясь от –0,1°С (на равнинной территории) до –6,7°С (на горной). Самый холодный месяц – январь, наиболее теплый месяц – июль. Абсолютные значения температуры воздуха: минимум –50°С, –55°С, максимум 36°С – 38°С. Средние даты перехода температуры воздуха через 0°С в долинах начинается в середине марта, а в горных частях бассейна в апреле – начале мая; осенью – в октябре и сентябре соответственно [Климатические особенности, 1979].

Распределение осадков по территории бассейна неравномерно. Наибольшее количество влаги на территорию бассейна р. Селенги приносят воздушные массы, приходящие с юго-востока [Марченко, 2013]. Соответственно, наибольшее количество осадков выпадает в высокогорьях Хангайско-Хэнтэйской горной области (400-500 мм). Средняя годовая сумма осадков составляет в среднем от 230 до 700 мм. Наименьшее количество влаги приносят воздушные массы с севера - в долинах рек Орхона, Туула и Селенги (200-250 мм). В бассейне Уды и российской части бассейна Селенги среднегодовое количество осадков составляет 300 мм [Воропай и др., 2015]. В бассейне реки Хараа (Монгольская часть) выпадает 250-300 мм, однако около 90% испаряется [Hofmann et al., 2015]. До 80 – 90% годовой суммы осадков выпадает в жидком виде. Лишь в самой северной части территории количество осадков, выпавших в виде снега, достигает 30 – 50% годовой суммы. Средний суточный максимум осадков равен 30 – 40 мм. Часто наблюдаются продолжительные обложные дожди, которые отличаются большой (3-5 суток) продолжительностью и малой интенсивностью. Во время выпадения

обложных дождей почвогрунты на водосборах быстро насыщаются влагой, дождевые воды без больших потерь достигают русла рек и нередко образуют высокие паводки.

1.1.3 Гидрологическая характеристика

Неравномерный режим выпадения осадков и большие перепады температур главным образом определяют гидрологический режим р. Селенги и ее притоков. Для бассейна р. Селенги характерен дальневосточный тип водного режима с продолжительными летними дождевыми паводками и невысоким весенним половодьем, в котором основным источником питания являются дождевые осадки [Афанасьев, 1976; Фролова и др., 2017]. Весеннее половодье связано с таянием неравномерно распределенного маломощного снежного покрова. Оно хорошо выражено на реках западной и северной части бассейна Селенги, где формируются наибольшие снегозапасы. В бассейнах Идэр и Делгер-Мурэн, Чикоя, Хилка и Уды доля талых вод в годовом объеме стока составляет до 20-30%. Даже при достаточном количестве снега более значительным источником водопоступления могут быть дожди, выпадающие в основном в горах [Гармаев, Христофоров, 2009; Ресурсы поверхностных вод СССР…, 1973]. Глубоко, как правило, промерзшие зимой почвогрунты весной оттаивают медленно, и потери талого стока на инфильтрацию обычно невелики. Половодье начинается в среднем в первой половине апреля, а заканчивается во второй половине мая – начале июня. Максимальный сток наблюдается с июня по сентябрь во время сезона дождевых паводков. В отдельные годы дождевые паводки проходят и в более ранние сроки (апрель-май), накладываясь на волну половодья. До 70 – 80% годового стока приходится на паводковый сезон. В многоводные же годы паводочный сезон может продолжаться почти в течение всего теплого периода [Афанасьев, 1976]. Зимняя межень длится 4-5 месяцев и характеризуется наиболее низкой в году водностью, перемерзанием на мелководных участках рек [Промахова, 2016], устойчивым ледоставом. В эту фазу водного режима проходит 5-7% годового стока неперемерзающих рек.

Систематические стационарные наблюдения за речным стоком в бассейне р. Селенги начаты с 1930-х годов [Гидрологический режим рек…, 1977]. Расширение сети постов на крупных реках бассейна было вызвано развитием регулярного судоходства. На данный момент на территории бассейна функционирует 62 гидрологических поста, из них 44 относится к российской части бассейна, 18 - к Монгольской [Chalov et al., 2015]. Во многих частях региона гидрометеорологические станции после распада СССР перестали действовать, особенно на труднодоступных участках бассейна [Unger-Shayesteh et al., 2013; Mannig et al., 2013]. Иными словами, покрытие водосбора сетью метеорологических станций и гидрологических постов явно недостаточно. Они расположены

преимущественно в речных долинах, а основные паводкообразующие осадки выпадают в верховьях рек, в горах, и они остаются незафиксированными [Государственный водный кадастр…, 1986].

Стоит отметить, что формирование речного стока в бассейне р. Селенги происходит в основном в пределах гольцовых, подгольцовых и горно-таежных лиственничных ландшафтов. Была предпринята попытка обнаружить какую-либо устойчивую связь между атмосферными осадками и речным стоком, но данные по осадкам оказались нерепрезентативными. Это вынуждает ограничиться статистическим анализом данных гидрометрических наблюдений и использованием осредненных во времени и пространстве климатических показателей [Гармаев и др., 2000; Гармаев, Христофоров, 1996].

В последние годы на гидрологический режим р. Селенги все большее влияние начинает оказывать экономическая деятельность в ее бассейне.

Территория бассейна р. Селенги является наиболее индустриально развитым и населенным регионом Монголии и Бурятии. В связи с этим, важнейшую роль в изменении количества и качества водных ресурсов в бассейне Селенги стала играть горнодобывающая и обрабатывающая деятельность, которая особенно активизировалась в последние десятилетия как в Монголии, так и в республике Бурятия [Thorslund, 2012; Theuring et al., 2015, Касимов и др., 2017]. По оценкам [Batsukh et al., 2008] более чем троекратный прирост населения Монголии и последовавший за ним рост городского населения привел к существенному увеличению использования поверхностных водных ресурсов. В результате большого водозабора малые реки пересыхают и сток прекращается. В целях обеспечения электроэнергией быстро растущей национальной экономики, Монголия приступила к проработке проектов по строительству гидротехнических сооружений в трансграничном бассейне реки Селенги. В результате оценка современного и ожидаемого (возможного) использования водно-энергетических ресурсов бассейна Селенги и их гидролого-геохимических и экологических последствий стал одним из наиболее актуальных вопросов в Байкальском регионе. Реализация планов по гидроэнергетическому строительству на территории Монголии (планируется строительство 4-х ГЭС) может привести к изменению водного режима Селенги, переноса растворенных и взвешенных (в том числе загрязняющих) веществ в бассейне.

1.2 Обзор существующих оценок многолетних изменений климата и речного стокав бассейне р. Селенги по данным наблюдений

1.2.1 Оценки многолетних изменений регионального климата

Согласно докладу Росгидромета [Второй оценочный доклад…, 2014] основной особенностью современных изменений глобального климата является глобально потепление конца XX в. – начала XXI в. (начиная со второй половины 1970-х годов). По данным [IPCC, 2013] за период инструментальных наблюдений среднегодовая глобальная температура воздуха увеличилась на 0,72°С, при этом осредненная по территории России среднегодовая аномалия температуры воздуха (отклонение от среднего за 1961-1990 гг.) существенно выше и составляет +1,69°С [Доклад об особенностях климата…, 2017]. Климатические изменения для бассейна р. Селенги столь же значительны.

В последние годы появилась целая серия публикаций, в которых рассматривается изменение температуры воздуха на территории российской части бассейна Селенги по данным наблюдений [Обязов, 1999; Шимараев и др., 2002; Korytny et. al., 2003; Мещерская и др., 2009; Абасов и др., 2010; Хажеева, 2014]. Все авторы отмечают факт ее увеличения в летний период.

Темпы потепления в районе оз. Байкала за последнее столетие (1,2°С) существенно превысили темпы роста глобальной температуры воздуха, но были существенно ниже, чем над окружающей сушей (2°С для г. Иркутска), что может быть следствием инерции водных масс Байкала [Шимараев и др., 2002].

В работе [Шимараев и др., 2002] показано, что в районе оз. Байкал можно выделить короткие (2-7 лет) и длительные (~20 лет) циклы с фазами повышения и понижения водности. В результате в XX в. можно выделить два полных цикла годовой температуры воздуха (1912—1936 гг. и 1937— 1969 гг.) и фазы двух неполных циклов — понижения с 1896 до 1911 г. и подъема с 1971 г. Последняя фаза подъема с 1971 г. отличается аномально большой продолжительностью (~25 лет) и ростом температуры воздуха на 2,1°С. Темпы роста температуры роста за 100 лет для различных сезонов отличаются: для зимнего и весеннего периода прирост температуры воздуха составил 2,0°С и 1,4°С, соответственно; для летнего и осеннего 0,8°С и 0,5°С, соответственно.

Как отмечалось уже выше, большая часть бассейна Селенги (верхнее и среднее течение) расположена на территории Монголии. В работах [Batima et. al., 2005; Integrated water management…, 2012; Otgonsuren and Erdenesukh, 2013] проанализированы современные изменения климата в Монголии. В восточных районах Монголии за последние 70 лет среднегодовая температура воздуха возросла на 2°С [Otgonsuren and Erdenesukh, 2013]. В среднем для всей территории Монголии средняя температура воздуха

с 1940-х годов увеличилась на 1,8°С [Batima et al., 2005], что наиболее выражается зимой в горных районах Западной и Северной Монголии [Dagvadorj, 2000]. Согласно данным [Integrated water management…, 2012] на монгольской части бассейна Селенги за 1940-2007 гг. среднегодовая температура воздуха увеличилась на 2,4 °С, причем 9 самых теплых лет наблюдались после 1990 года. Если рассматривать внутрисезонную изменчивость, то по данным за 1940-2001 гг. повышение температуры наиболее характерно для зимы (на 3,6°С), когда как весенние, осенние и летние температуры воздуха увеличились на 1,8°С, 1,3°С и 0,5°С, соответственно [Batima et al., 2005].

В работах [Tang et. al., 2012; Törnqvist et al., 2014; Фролова и др., 2017] современные изменения климата для всего бассейна р. Селенги исследовались по данным базы данных CRU TS (Climatic research unit time-series), которая создана в Университете Восточной Англии и включает среднемесячные метеорологические характеристики, интерполированные в узлы регулярной сетки 0,5°×0,5° на основе данных метеорологических станций. База данных CRU предоставлена в открытом доступе и позволяет исследовать современные изменения климата для любой территории (кроме Антарктики) в наибольшем пространственном масштабе [Harris et al., 2014]. Анализ полноты и репрезентативности данных для исследованной территории представлен в работе [Törnqvist et al., 2014].

В работе [Tang et. al., 2012] представлены результаты анализа пространственной структуры температурных аномалий по данным CRU (версия TS3.1) на территории Евразии. Исследовались распределения трендов максимумов дневных летних температур воздуха за 1982 по 2009 гг., внутри которого авторы выделили 3 периода: 1982-2009, 1982-1995, 1996-2009 гг., что соответствуют сменам фаз водности Селенги. В 1982 году закончился маловодный период и до 1996 наблюдалось увеличение стока.

В работе [Törnqvist et al., 2014] по данным CRU той же версии за период 1938-2009 гг. проанализированы многолетние климатические колебания в бассейне Селенги и показано, что среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,6°С, что более чем в два раза превышает темпы роста глобальной температуры воздуха. Кроме того, темпы роста температуры воздуха на территории бассейна в течение последнего 20-летнего периода (1989-2009 гг.) в два раза выше (0,48°С за десятилетие), чем за весь 72-летний период (0,22°С за десятилетие).

Выделяются две особенности изменений атмосферных осадков в бассейне р. Селенги. Первая заключается в том, что количество осадков, выпадающих на территории бассейна, аномально велико для северной окраины аридного пояса Азиатского континента (северная часть Монголии, юг Восточной Сибири), находящейся на большом удалении от

источников влаги [Жаков, 1982]. Другая особенность выпадения атмосферных осадков в центральной и восточной Азии выражается в том, что за периодами с аномально высоким количеством осадков могут следовать засухи и наоборот. Анализ карт распределений аномалий в работе [Марченко, 2013] показал, что аномалии охватывают весь бассейн Селенги. Автором этой работы обнаружена связь между вариациями стока р. Селенги и изменениями характера циркуляции атмосферы на обширной территории, включающей область распространения Восточноазиатского муссона и южную периферию западных переносов умеренных широт [Марченко, 2013].

Среднегодовое количество осадков в бассейне уменьшается. По данным архива реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction / The National Center for Atmospheric Research) за 1948-2013 гг. в среднем по водосбору р. Селенги интенсивность осадков уменьшилась на 11 % [Сутырина, 2015]. На территории Забайкалья за период 1936-2010 г. сумма годовых осадков сократилась на 50-100 мм, а местами (главным образом в северной части бассейна) выросла на 50 мм [Мещерская и др., 2009]. На территории монгольской части бассейна количество годовых осадков сократилось на 37,5 мм [Integrated water management…, 2012].

В статье [Фролова и др., 2017] по данным CRU версии TS 3.23 проанализирована динамика изменения осадков, испаряемости и индекса аридности как для всего бассейна Селенги, так и для ее подбассейнов (до створа с. Зуунбурен, от с. Зуунбурен до с. Наушки и от с. Наушки до рзд. Мостовой). В соответствии с классификацией UNESCO [Map of the World distribution of arid regions, 1979] было выявлено, что участки бассейна р. Селенги до створа с. Зуунбурен и участок от с. Наушки до устья относятся к субгумидной зоне, а участок от с. Зуунбурен до с. Наушки – к семиаридной. Во всех подбассейнах отмечены уменьшение слоя осадков и рост слоя испаряемости, что приводит к увеличению индекса аридности. Наибольший рост испаряемости (до 700 мм) наблюдается до створа с. Наушки, т.е. в наиболее высокогорном районе. Как известно, рост температуры воздуха выше в высокогорных районах [Bradley et al., 2006; Immerzeel et al., 2009].

Для верховья притока р. Хараа, территория которого находится примерно в 100 км к северо-западу от г. Улан-Батора, по данным натурных наблюдений сравнивалась динамика эвапотранспирации с горных степей и кустарниковых участков лесостепи, характерных для горных районов Северной Монголии и южной Сибири, соответственно [Minderlein and Menzel, 2014]. В данном регионе южные склоны характеризуются очень низкой влажностью почвы и обычно они покрыты степью, тогда как таежные леса сохраняются за счет прерывистой многолетней мерзлоты, которая является важным источником почвенной воды во время летних засух. По данным [Karthe et. al., 2014]

потенциальная эвапотранспирация превышает среднегодовые осадки в три раза. Согласно выводам [Minderlein and Menzel, 2014] кустарниковая зона и тайга играют важную роль для обеспечения доступности воды в районах, расположенных ниже по течению.

Снижение количества атмосферных осадков и увеличение среднегодовой температуры в областях с резко континентальным климатом, к которым относится и бассейн Селенги, в долгосрочной перспективе способствует аридизации климата и может привести к опустыниванию значительных площадей на водосборе. На территории Южной Сибири и Монголии лесные массивы служат важным барьером на пути распространения процессов опустынивания [Гунин и др., 2008]. Учитывая интенсификацию животно-водческой нагрузки на монгольскую часть бассейна, опустынивание представляет реальную опасность для экосистемы и социально-экономической сферы в бассейне.

1.2.2 Оценки многолетних изменений водного режима

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; Обязов и Смахтин, 2012; Синюкович и др., 2013; Ильичева и др., 2014; Фролова и др., 2017]. За период гидрологических наблюдений в стоке Селенги (по данным гидропоста рзд. Мостовой) можно выделить 2 полных цикла: 1932-1958 и 1959-1982 гг. Многоводные периоды наблюдались - в 1932-1943, 1959-1975гг., а маловодные в - 1944-1958, 1976-1982 гг. Многоводная фаза третьего цикла длилась с 1983 по 1995 гг., после чего с 1996 г. наблюдается самое продолжительное маловодье за весь период инструментальных наблюдений. Стоит отметить, что по сравнению с базовым периодом 1961-1990 гг., за 1996-2015 гг. отмечается уменьшение стока Селенги в 1,4 раза. Примерно в этот же период на монгольской территории сток Селенги уменьшился в 1,5 раза, по сравнению с нормой стока за 1961-1990 гг. [Фролова и др., 2017].

Колебания максимальных расходов воды достаточно тесно связаны со среднегодовыми расходами [Гармаев, Христофоров, 2010], особенно на крупных реках в связи с эффектом наложения паводочных волн. Вслед за общим снижением водности в бассейне Селенги наблюдается уменьшение максимальных расходов. Самые низкие максимальные расходы воды на Селенге в пределах российской части бассейна были зафиксированы в 2007 г., а на притоках минимумы, как правило, относятся к 2007, 2011 гг. либо к периоду с 1972 по 1981 г. Наибольшие расходы в верхнем течении Селенги были отмечены в 1993 г., в 1998 был зафиксирован абсолютный максимум на р. Хилок. Высокие паводки приводят к опасным для населения и хозяйства явлениям –

наводнениям. Стоит отметить, что после 1998 г. крупных наводнений в бассейне Селенги не отмечалось.

Сокращение среднегодового стока происходит главным образом за счет уменьшения расходов летних паводков (на 5-35 %), а это в свою очередь происходит из-за сокращения суммарных и максимальных осадков за летний период (на 12%) [Фролова и др., 2017]. Уменьшение максимальных расходов воды, увеличение повторяемости половодий на основе данных наблюдений также установлено в работе [Хажеева, 2014]. Однако, автор отмечает, что в юго-западных горных районах (бассейны рек Джида и Темник) за последние годы сток увеличился.

В статье [Чалов и др., 2016] сделано предположение, что современные климатические колебания проявляются в снижении среднего стока воды в нижнем течении Селенги, сопровождающиеся уменьшением максимальных и увеличением минимальных расходов воды. Анализ меженного стока (ноябрь-март) Селенги в работе [Синюкович и др., 2013] показал, что с 1935 г. наблюдался рост зимней водности Селенги, однако с 1996 г. зимний расход заметно сократился из-за снижения влагонасыщенного деятельного слоя и запасов подземных вод, вследствие снижения общего увлажнения бассейна и водности в теплое время года. Наблюдаемый рост и увеличение изменчивости минимальных зимних расходов в бассейне Селенги [Фролова и др., 2017] связывается с ростом зимней температуры воздуха [Обязов и Смахтин, 2013; Dashkhuu et al., 2015].

В работе [Törnqvist et al., 2014] делается вывод, что фактором сокращения речного стока в бассейне р. Селенги является рост испарения вследствие увеличения температуры воздуха. Однако в работе [Фролова и др., 2017] авторы наоборот отмечают некоторое сокращение испарения в текущий маловодный период (по данным за 2002-2014 гг.) по сравнению с 1934-1975 гг., при этом ведущим фактором уменьшения испарения для бассейна Селенги, несмотря на рост испаряемости, по их мнению, является уменьшение влажности почвы [Sato et al, 2007] и рост потерь на инфильтрацию в результате деградации многолетней мерзлоты [Smith et al., 2007; Yoshikawa and Hinzman, 2003; Zhao et al., 2010].

На территории монгольской части бассейна р. Селенги, по данным [Batima, 2006], начиная с 1970-х, среднегодовая температура многолетней мерзлоты увеличилась от 0,05 до 0,15°С. В статье [Törnqvist et al., 2014] отмечают уменьшение внутригодовой изменчивости стока, что может быть следствием увеличения разгрузки подземных вод в речную систему из-за деградации многолетней мерзлоты. В таком случае, повышение зимнего стока будет определяться только запасами воды в подземных бассейнах [Синюкович и др., 2013].

Около половины годового стока Селенги составляет сток за летний период (июнь–август), также невелика роль в питании реки и подземных вод [Бережных и др., 2012], поэтому основная причина вариаций стока - изменчивость летних атмосферных осадков.

Однако очевидную, казалось бы, связь между количеством осадков, испарением и стоком реки в маловодный период сложно подтвердить количественно. В работах [Ma et al., 2003; Синюкович, 2010] проведены расчеты водного баланса исследуемой территории, результаты которых содержат значительную неопределенность из-за неточности определения суммарного количества атмосферных осадков и несовершенства методик расчета испарения для бассейна Селенги. В статье [Törnqvist et al., 2014] установлены незначительные изменения значений среднегодовых компонентов водного баланса (осадки, эвапотранспирация и сток) между периодами 1961-1980 и 1986-2005 гг., хотя с 1996 начинается маловодный период. В результате показано, что большая часть осадков (85%) теряется через эвапотранспирацию, что согласуется с независимой оценкой эвапотранспирации методом Пенмана-Монтейта [Ma et al., 2003] на территории монгольской части бассейна.

В ряде публикаций делается предположение, что основной причиной современного маловодья р. Селенги может являться уменьшение атмосферных осадков летом в регионе, охватывающем часть Монголии, Север Китая и юг Восточной Сибири на территории России. По мнению [Бережных и др., 2012], уменьшение осадков связано с общим ослаблением циркуляции в области конвергенции воздушных масс умеренных широт и восточно-азиатского муссона. Предполагается, что причиной ослабления может быть уменьшение интенсивности фронтальной системы, способствующей продвижению муссонной влаги к бассейну Селенги, так как природа этого муссона в северных районах Восточной Азии является циклонической [Antokhina et al., 2018]. Атмосферные блокинги являются одним из возможных механизмов формирования этой фронтальной системы. В работе [Antokhina et al., 2016] подтверждают существование связи тенденции увеличения количества осадков летом в Восточной Сибири и уменьшения над Монголией с повторяемостью событий блокирования над Восточной Европой. Блокинги, возникающие над Европой, приводят к противоположным распределениям аномалий осадков в Монголии и Восточной Сибири [Антохина и др., 2018]. При блокировании над Восточной Сибирью, в свою очередь, ситуация обратная – много осадков выпадает в Монголии и мало в Восточной Сибири. Можно предположить, что эти изменения отражают глобальные изменения общей циркуляции атмосферы, происходящие в климатической системе. Анализ вариаций средних скоростей меридионального переноса над территорией Монголии и Северного Китая позволил выделить два периода, отличающихся по

характеру изменчивости величин – 1948–1975 и 1976–2011 гг. [Бережных и др., 2012]. Для первого периода характерны интенсивные переносы воздушных масс, низкие значения давления и температуры. Во второй период резко снизилась интенсивность циркуляции, выросли значения температуры и геопотенциала. Ослабление Азиатского антициклона отмечается в работе [Макагонова, 2013], вследствие сдвига, происходящего в январе.

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

Для оценки возможных гидрологических изменений в условиях изменяющегося климата для бассейна р. Селенги, соответствующей региональному пространственному масштабу, в современных исследованиях используются данные докладов Межправительственной группы экспертов по изменению климата [МГЭИК] [IPCC, 2001; IPCC, 2007; IPPC, 2013]. В рамках подготовки пятого (последнего) доклада был организован очередной проект по анализу климата с помощью глобальных климатических моделей (Global Climate Models, GCMs). Основу этого проекта, получившего название CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5) [Taylor et al., 2012], и являющегося пятой фазой проекта CMIP, составили расчеты климата XXI в. при заданных в соответствии с данными наблюдений концентрациях парниковых газов и аэрозолей. Согласно последнему отчету [IPCC, 2013], в новой системе сценариев антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему RCP (Representative concentration pathways: репрезентативные траектории концентраций) выделено четыре сценария, построенных в соответствии с ожидаемым к 2100 году потоком радиации на верхней 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^2). Продолжающаяся эмиссия парниковых газов будет являться причиной дальнейшего потепления и изменений во всех компонентах климатической системы. Ограничение климатических изменений потребует значительного и непрерывного снижения выбросов парниковых газов. Сценарии SRES (Special Report on Emissions Scenarios – специальный Доклад о сценариях выбросов) относятся к предыдущему поколению [IPCC, 2001] и в отличии от RCP естественная изменчивость климатообразующих факторов сценариями SRES не охватывается [Второй оценочный доклад…, 2014]. Принципиальное отличие между поколениями сценариев выражается в используемом подходе: в сценариях SRES используется последовательный подход (каждый отдельный сценарий формируется последовательно в соответствии с предыдущим сценарием), а в RCP – параллельный (каждый сценарий отдельно нацелен на определенную траекторию радиационного воздействия) [Goosse et al., 2010].

К настоящему моменту проведено несколько исследований возможного влияния изменений климата на речной сток на монгольскую часть бассейна р. Селенги [Batima, 2006; Menzel et al., 2008; Malsy et al., 2011; 2012; 2013] и для всего бассейна [Törnqvist et al., 2014; Морейдо и Калугин, 2017; Karthe et al., 2017] на основе данных глобальных моделей климата.

В работе [Sato and Kimura, 2006] показано, что к концу XXI века ожидается, что температура воздуха увеличится еще на 2°С летом и на 1°С зимой. При этом будет расти количество зимних осадков и уменьшаться количество летних, тем самым ожидается снижение влажности почвы, т.е. зима в Монголии будет более мягкой и снежной, а лето более засушливым и жарким.

В работе [Batima, 2006] оценка будущих климатических изменений проводилась с использованием данных глобальных климатических моделей по двум сценариям SRES (A2 и B2). Показано, что к концу XXI века и зимой, и летом в регионе ожидается рост температуры, как при более жестком сценарии техногенных воздействий на климат A2, так и при более мягком B2. Помимо оценки возможных климатических изменений также были проведены модельные эксперименты с помощью концептуальной модели формирования речного стока с сосредоточенными параметрами The Basin Conceptual Model (BCM). BCM – балансовая модель, в которой расчет характеристик речного стока ведется по среднемесячным значениям осадков, температуры воздуха, потенциальной эвапотранспирации, была разработана для оценки изменений водных ресурсов в условиях изменяющегося климата [Yates and Strzepek, 1994]. Модельные эксперименты показали, что к 2080 году сток монгольской части бассейна Селенги уменьшится на 20%. По результатам моделирования в работе [Batima, 2006] также была оценена чувствительность речного стока к изменению климатических параметров (осадков и температуры воздуха). Результаты показали, что речной сток гораздо более чувствителен к изменению осадков, чем к изменению температуры. Увеличение средней по бассейну нормы температуры воздуха на 1°С (при неизменной норме осадков) приводит к уменьшению рассчитанного по модели годового стока р. Селенги на 4%. Увеличение средней по бассейну суммы осадков на 10% (при неизменной температуре воздуха) приводит к соответствующему увеличению стока на 12,8%.

В 2006 г. был создан немецко-монгольский исследовательский проект MoMo (Integrated Water Resources Management in Central Asia: **Mo**del Region **Mo**ngolia), основной целью которого является разработка и реализация стратегий для интегрированного управления водными ресурсами Монголии. Основным объектом для модельных экспериментов выбран бассейн р. Хараа, один из притоков р. Селенги. В рамках этого проекта оценка возможных изменений водного режима в условиях изменяющегося климата проводились с помощью глобальной гидрологической модели WaterGAP (**Water G**lobal **A**ssessment and **P**rognosis) [Menzel et al., 2008]. Модельные эксперименты проводились для всей территории Монголии для анализа влияния на водный режим изменения климата и землепользования в XXI веке по сценариям SRES A1B и B1. В этой

же работе описываются результаты моделирования возможных изменения водного режима отдельно для бассейна р. Хараа на основе широко распространенной концептуальной модели HBV-D [Bergström, 1995]. По всем сценариям и использованным в работе GCMs прогнозируется увеличение осадков (до 20%) и увеличение эвапотранспирации (до ~22%), вследствие увеличения температуры, что в семиаридном регионе приведет к увеличению весеннего таяния снега, и, соответственно, к увеличению весеннего стока на 30-40%.

В работе [Tornros and Menzel, 2010] с помощью концептуальной модели HBV-D на основе расчетов за исторический период (1990-2002 гг.) пришли к выводу снижение стока в бассейне р. Хараа произошло вследствие изменения регионального климата, а не за счет увеличения водопользования.

Помимо этого, были проанализированы компоненты водного баланса и гидрограф бассейна р. Хараа с помощью физико-математической модели SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [Hülsmann et al., 2014]. Авторы отмечают, что из-за мерзлых грунтов весной образуется только поверхностный сток. Летом за счет оттаивания прерывистой многолетней мерзлоты происходит подпитка грунтовых вод. Отмечается, что зимний сток уменьшается за счет образования наледи.

Для оценки региональных климатических изменений при реализации проектов добычи полезных ископаемых на исследуемом бассейне в работе [Чалов и др., 2016] была проведена адаптация мезоклиматической модели COSMO-CLM – климатическая версия модели COSMO, разрабатываемая консорциумом Consortium for Small-scale Modeling, включающим в себя национальные службы прогноза погоды ряда стран, в том числе Росгидромет. С помощью модели были проведены численные эксперименты с учетом антропогенного изменения ландшафтов в зоне угледобычи на территории Монголии, задаваемого путем уменьшения значений коротковолнового альбедо земной поверхности, и его влияния на теплообмен с атмосферой. Численные эксперименты показали, что в результате антропогенного изменения ландшафтов произойдет трансформация водного баланса.

Для оценки гидроклиматических изменений для всего бассейна р. Селенги в работе [Törnqvist et al., 2014] использовался мультимодельный ансамбль, состоящих из 22 глобальных климатических моделей из проекта CMIP5, для периодов XXI века - 2010-2039 и 2070-2099 гг. Результаты модельных экспериментов [Törnqvist et al., 2014] показали, что ансамблевые прогнозы дают увеличение температуры воздуха на 5°C к концу XXI века (2070-2099 гг.). Соответственно деградация многолетней мерзлоты продолжится. Однако, большая часть моделей CMIP5 и их мультимодельный ансамбль

переоценивают увеличение осадков за исторический период и недооценивают увеличение испарения. Как следствие, модели показывают рост стока за исторический период в бассейне р. Селенги.

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.

Получение 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. В работе [Морейдо и Калугин, 2017] впервые была разработана региональная физико-математическая модель формирования стока для всего бассейна р. Селенги на основе ИМК ECOMAG, более подробное описание которого будет приведено в Главе 2. При калибровке в качестве входных данных использовались данные реанализа ERA-Interim, разработанного ECMWF (Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды) [Deea et al., 2011]. Для проведения климатических экспериментов была подготовлена база данных шести глобальных моделей климата (GCM) на основе проекта ISI-MIP2 (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project Phase 2). Сценарные расчеты по каждой GCM проводились для четырех RCP-сценариев изменений внешних радиационных воздействий, в результате чего получен ансамбль траекторий возможных изменений метеорологических элементов в XXI в. Результаты показали, что в зависимости от будущих сценариев антропогенных воздействий в бассейне р. Селенги вероятен рост температуры воздуха на 1-6°C и увеличение увлажненности на 5-12 %, в связи с чем на протяжении всего XXI в. при каждом из сценариев эмиссии парниковых газов водность в бассейне р. Селенги уменьшится. Особенно это проявляется во второй половине века при сценариях RCP 6.0 и RCP 8.5, когда прогнозируемые величины стока уменьшаются на 20-40% относительно исторического периода по ансамблю глобальных моделей климата. Модель, предложенная в работе [Морейдо и Калугин, 2017], была верифицирована по данным наблюдений, не включавшим разные фазы водного режима, и ее применимость для описания изменений водного режима в климатических условиях, отличных от современных, не были исследованы. Кроме того, для построения модели были привлечены глобальные базы данных, сильно генерализованные для монгольской части водосбора.

Разработка физико-математической модели бассейна р. Селенги с распределенными параметрами, которая позволяет воспроизвести современные изменения водного режима с использованием детальных данных о подстилающей поверхности, а также исследование применимости модели для описания изменений водного режима в климатических условиях, отличных от современных, описаны в следующей главе.

Глава 2. Разработка модели формирования стока в бассейне р. Селенги: описание, результаты испытаний, оценка робастности

2.1 Описание структуры модели и требований к исходным данным

Для разработки модели формирования стока бассейна р. Селенги использовался информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics), созданный в Институте водных проблем РАН Ю.Г. Мотовиловым [Motovilov et al., 1999; Мотовилов, 2016а,б] на основе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов [Кучмент и др., 1983]. ИМК ECOMAG успешно апробирован для решения научных и прикладных гидрологических задач в бассейнах российских и зарубежных рек разного размера, расположенных в различных физико-географических условиях формирования стока [Motovilov et al., 1999; Данилов-Данильян и др., 2014; Gelfan et al., 2015а,б; 2017].

ИМК ECOMAG включает в себя: расчетный модуль – физико-математическую модель формирования речного стока ECOMAG, географическую информационную систему (ГИС), почвенные, ландшафтные и гидрометеорологические базы данных и управляющую оболочку. С помощью управляющей оболочки можно связывать информацию ГИС для рассматриваемого бассейна с базами данных, после чего результаты расчетов визуализируются в виде графиков и схематических карт территории.

В модели формирования стока ECOMAG описываются 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.

Схема всех процессов, на основе которых создана модель, описывается следующим образом: в летний период осадки, выпадающие в виде дождя, частично перекрываются растительностью и, соответственно, частично проникают в почву. Непоглощенный почвой избыток воды после заполнения депрессий на поверхности бассейна по уклону попадает в речную сеть. Та часть влаги, что впиталась в почву, может перемещаться по уклоны по относительно непроницаемым водоупорам. Часть воды, не попавшая в речную сеть, в результате расходуется на испарение или дренаж в более глубокие горизонты почвы. В холодный период года дополнительно учитываются гидротермические процессы в снежном покрове и почве: процессы формирования снежного покрова и снеготаяния, промерзания и оттаивания почвы, инфильтрации незамерзшей влаги в мерзлую почву.

Поверхность речного бассейна при модельной схематизации разделяется регулярной или нерегулярной сеткой на отдельные расчетные элементы (элементарные водосборы) с учетом особенностей рельефа и структуры речной сети (Рис.2.1.1).

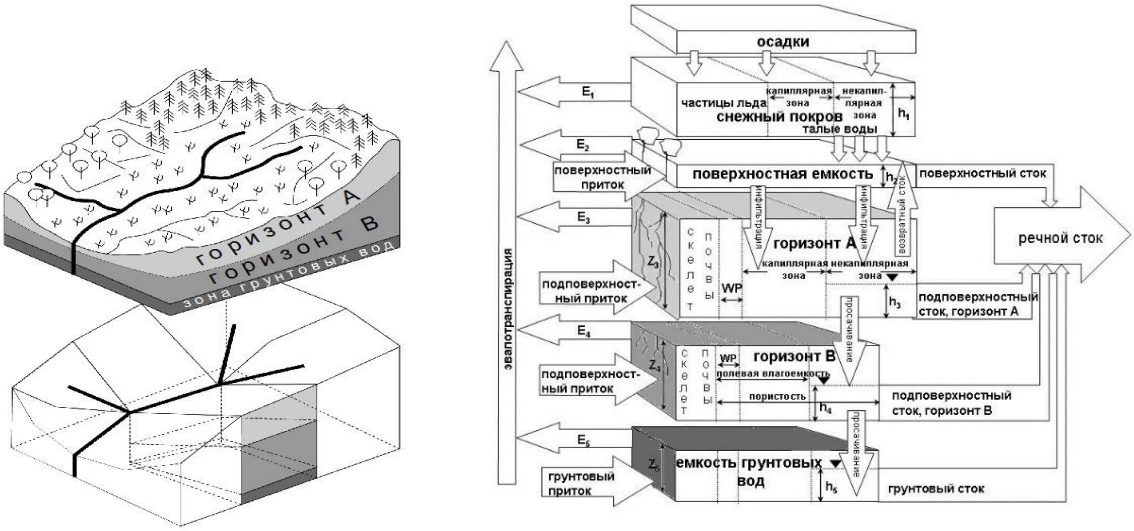

Рисунок 2.1.1 Схематизация речного бассейна и вертикальная структура гидрологической модели для расчетного элемента (элементарного водосбора)

Для каждого элементарного водосбора моделирование гидрологических процессов 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, соответственно, учитывается емкость снежного покрова [Мотовилов, 2016а]. Таким образом, структура расчетного элемента позволяет отразить пространственные неоднородности рельефа, почв, землепользования, строения гидрографической сети, а также учесть пространственные особенности полей внешних гидрометеорологических воздействий.

В модели ECOMAG гидрологические процессы в пределах расчетных элементов описываются системой дифференциальных уравнений, большая часть которых получена путем интегрирования по пространству соответствующих базовых уравнений в частных производных детальных физико-математических моделей, либо путем отбрасывания второстепенных членов этих уравнений [Vehviläinen and Motovilov, 1989], либо привлечением иных упрощенных схем описания процессов, принятых в определенных пространственно-временных масштабах. Стоит отметить, что полураспределенные модели сохраняют основные черты и преимущества физико-математических моделей с распределенными параметрами и в то же время менее требовательны к составу и полноте исходной информации, а также менее чувствительны к ошибкам этой информации что при недостаточности данных наблюдений является преимуществом [Wooldridge and Kalma, 2001; Haghnegahdar, 2015; Savvidou et al., 2018].

В течение теплого периода года для описания основных гидрологических процессов используются следующие алгоритмы [Motovilov et al., 1999; Мотовилов, 2016a]:

Горизонт почвы А.

Интенсивность инфильтрации воды в почву. Предполагается, что интегральная пространственная функция распределения *F(k)* вертикальной гидравлической проводимости насыщенной почвы (коэффициента фильтрации) *(k)* для каждого элементарного водосбора подчиняется экспоненциальному закону:

$$F(k) = 1 - \exp(-\alpha k) \ , \ \alpha = \frac{1}{k_m} \ , \qquad (2.1.1)$$

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 тогда для всей области элементарного водосбора средняя инфильтрация в почву (V_1) равна:

$$V_1 = \int_0^R \exp\left(-\alpha K\right) dK = K_m \left[1 - \exp(-R / K_m)\right] \qquad (2.1.2)$$

Впитывание воды в капиллярную и некапиллярную емкости почвы. Суммарная пористость (P) в зоне аэрации почвы разделяется на две части: капиллярную зону (верхний предел влажности W почвы - полевая влагоемкость, FC) и некапиллярую зону (разность, D, между P и FC). Разделение впитавшейся влаги между зонами в пределах элементарного водосбора производится с учетом пространственного распределения наименьшей полевой влагоемкости, которое описывается показательной функцией:

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

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

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

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

а просачивание в некапиллярную зону –

$$V_{1,nc} = V - V_{c,1}, \qquad (2.1.5)$$

где V_c и V_{nc} – интенсивность инфильтрации в капиллярную и некапиллярную зоны почвы, соответственно, W_1 – объемная влажность почвы.

Капиллярная зона. Водный режим капиллярной зоны почвы в горизонте А рассчитывается с использованием балансового уравнения в предположении отсутствия капиллярного оттока из почвенного слоя:

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

где Z_1 – мощность (глубина) почвенного горизонта А; E_1 – интенсивность эватранспирации, которая рассчитывается как:

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

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

Некапиллярная зона. Предполагается, что вода, поступающая в некапиллярную зону, может проникать в горизонт В с интенсивностью V_2, которая равна насыщенной гидравлической проводимости почвы K_2 в горизонте В. Если $V_{nc} > K_2$, то в некапиллярной зоне впитавшаяся вода может накопиться , после чего в направлении преобладающего уклона переместиться по относительному водоупору между почвенными горизонтами А и В. В период ливневых осадков в горизонте А некапиллярная зона может полностью заполниться, после чего будет формироваться возвратный поверхностный сток. Предполагается, что подповерхностное движение воды по водоупору сток описывается законом Дарси. В некапиллярной зоне для описания режима влаги используется следующее уравнение:

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

где K_x – гидравлическая проводимость насыщенной почвы в горизонтальном направлении, h_1 – уровень воды в некапиллярной зоне, b и L – ширина и длина ландшафтного элемента в плане, b_m – средняя ширина элемента, $Q_{1,0}$ и $Q_{1,L}$ – боковой приток и отток подповерхностных вод для ландшафтного элемента, R_r – интенсивность притока возвратных вод на поверхность, который формируется из-за избытка подповерхностного потока (bK_xih) над максимальной фильтрационной способностью горизонта (bK_xiZ), $Q_l = bK_{x,l}ih_l$, $D_l = P_l - FC_1$, $V_2 = K_2$, $b_m = \frac{b_L + b_0}{2}$; .

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

<u>Горизонт В.</u> В горизонте В режим влажности почвы описывается уравнением:

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

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. Поток грунтовых вод описывается уравнением:

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

где h_3 – уровень грунтовых вод, $Q_{3,0}$ и $Q_{3,L}$ – боковой приток и отток 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. Движение поверхностных вод по склонам рассчитывается с помощью интегрального уравнения кинематической волны:

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

где h_4 – глубина поверхностного потока, $Q_{4,0}$ и $Q_{4,L}$ – боковой приток и отток поверхностных вод для ландшафтного элемента, равный $Q_4 = i^{1/2} h_4^{5/3} b / n$, n – коэффициента шероховатости Маннинга, $R_0 = R - V_1 + R_r$.

Для описания процессов в течение холодного периода используются следующие алгоритмы:

Формирование снежного покрова и снеготаяние. Вследствие выпадающих осадков, испарения снега и его таяния, замерзания талой воды в снеге и его уплотнения, характеристики снежного покрова измененяются. 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 [Мотовилов, 1993]:

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

$$\frac{d}{dt}(W_s h_s) = R_r + S_T - E_l - R_w - S_f\,, \qquad (2.1.13)$$

$$\frac{dh_s}{dt} = \rho_W\left[\frac{R_s}{\rho_n} - \frac{S_T + E_s}{\rho_i I}\right] - v_s\left(h_s, I, W_s, T_s\right), \qquad (2.1.14)$$

где h_s – высота снежного покрова; I, W_s – объемные содержания твердой и жидкой фазы в снеге, R_s и R_r – интенсивности осадков в виде снега и дождя; R_w - интенсивность водоотдачи из снега при снеготаянии; T_s – температура поверхности снега; v_s - скорость уплотнения снега под действием собственной нагрузки; ρ_i, ρ_w и ρ_n - плотности льда, воды и свежевыпавшего снега соответственно.

Тепловой режим снега и почвы. В предположении, что вертикальные температурные профили в снеге, мерзлой и талой почве задаются линейными функциями глубины, а миграцией влаги со стороны талой зоны почвы к фронту промерзания можно пренебречь, уравнение Стефана, описывающее динамику глубины промерзания (H_f) и глубины оттаивания почвы (H_T), имеет аналитическое решение и величины H_f и H_T могут быть описаны следующими уравнениями [Vehviläinen and Motovilov, 1989]:

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

$$H_T = \left(H_f^{\,2} + \frac{2\lambda_T T}{Q_f}\delta t\right)^{0,5}, \qquad (2.1.16)$$

где H_g - глубина уровня грунтовых вод с температурой T_g, λ_s, λ_f, λ_T - коэффициенты теплопроводности снега, мерзлой и талой почвы, соответственно, T_0 - температура поверхности почвы под снегом, равная $T_0 = \frac{\lambda_S T H_f}{\lambda_S H_f + \lambda_f h_s}$, $Q_f = \rho_w L_f (W - W_u)$ – количество тепла, выделяемое на фронте промерзания (или поглощаемое на фронте оттаивания) L_i - скрытая теплота плавления льда, W_u – объемное содержание незамерзшей влаги в почве при 0°С.

Инфильтрация в мерзлую почву. Инфильтрация в мерзлую почву талых и дождевых вод описывается следующим уравнением:

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

где K_f – гидравлическая проводимость мерзлой почвы,

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

промерзшего слоя почвы, k_i – эмпирический параметр, равный 8. [Кучмент и др., 1983].

Речной сток. Боковой приток к элементу речной сети рассчитывается как:

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

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

С помощью упрощенной версии уравнения кинематической волны речной сток на элементе речной сети описывается как:

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

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 O и L обозначают величины на входе и выходе расчетного участка элемента речной сети).

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

В качестве граничных условий используются временные ряды трех метеорологических характеристик (суточные суммы осадков, среднесуточные значения температуры и влажности воздуха), которые можно задавать по имеющимся наблюдениям на сети гидрометеорологический станций, по данным метеорологического реанализа или рассчитываться по атмосферным моделям.

2.2 Оценка параметров, калибровка и проверка модели по данным наблюдений за характеристиками водного режима в различных створах речной сети

2.2.1 Создание баз исходной информации для модели формирования стока в бассейне р. Селенги

При разработке модели формирования стока бассейна реки на основе ИМК ECOMAG используются базы данных, которые включают в себя:

- Данные о характеристиках подстилающей поверхности бассейна;
- База метеорологических данных мониторинга или реанализа;
- База гидрологических данных мониторинга.

Информация о характеристиках подстилающей поверхности берется из картографических материалов: цифровая модель рельефа (ЦМР) различного разрешения, серии цифровых тематических карт (почвенная, ландшафтная и т.д.), карты расположения постов сети гидрометеорологического мониторинга.

Информация о рельефе используется из базы данных HYDRO1k с размером ячейки сетки матрицы 30x30 сек (эквивалентно пространственному разрешению 1x1 км) (Lehner et al., 2008) (Рис.2.2.1).

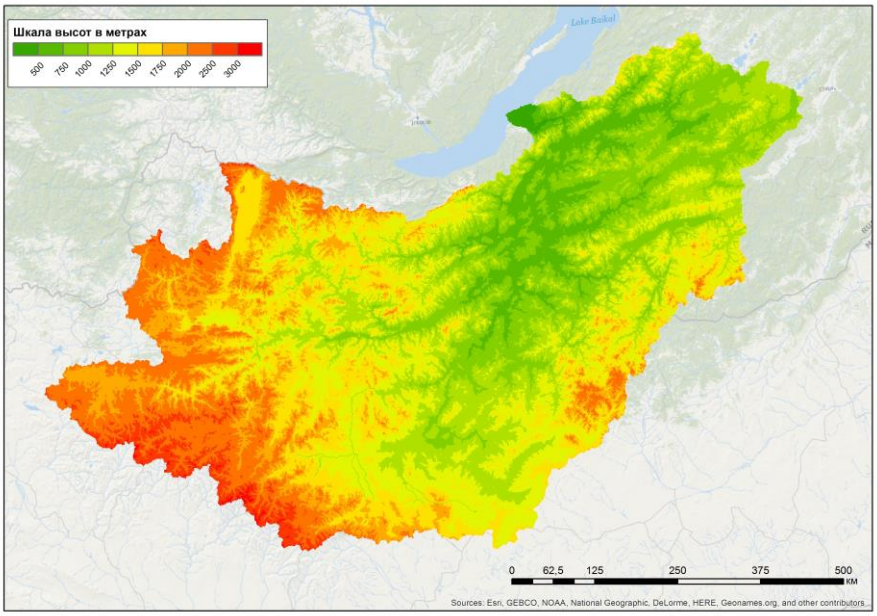

Рисунок 2.2.1 Цифровая модель рельефа бассейна р. Селенги

Стоит отметить, что в приведенных выше работах по применению ИМК ECOMAG для моделирования стока бассейнов рек РФ необходимые для оценки параметров характеристики растительности, ландшафтов и почв применялись на основе карт СССР масштаба 1:250000 (карта почв, разработанная под руководством Глазовской М.А. и ландшафтная карта, разработанная по руководством Николаева В.А.), которые не могут быть использованы для разработки модели формирования стока бассейна р. Селенги, т.к.

около 67 % площади бассейна р. Селенги приходится на территорию Монголии. В связи с этим были адаптированы глобальные базы данных: почвенная база Harmonized World Soil Database (HWSD) [FAO, 2012] и база землепользования Global Land Cover Characterization (GLCC) [Loveland et al., 2000]. Методика использования глобальных баз данных в структуре ИМК ECOMAG была разработана и применена ранее при построении модели формирования стока р. Амур [Калугин, 2016].

Почвенная база HWSD для монгольской части бассейна, которая использовалась для задания гидрофизических параметров почвы в модели [Морейдо и Калугин, 2017, Karthe et al., 2017] оказалась недостаточно подробной, что может повлиять на точность расчетов (Рис.2.2.2). Поэтому адаптация почвенной базы для территории всего бассейна р. Селенги проводилась на основе не только базы HWSD, но и карт типов почв из Экологического атласа бассейна оз. Байкала [Экологический атлас бассейна озера Байкал, 2015] и из Национального атласа Монголии [National Atlas of Mongolia, 2009], в результате чего пространственное разрешение для монгольской части исследуемого бассейна улучшилась (Рис.2.2.3; ср. с Рис.2.2.2). Распределение типов почв по данным HWSD на территории России полностью соответствует почвенной карте масштаба 1: 2 500 000, разработанной под руководством М.А. Глазовской, и почвенной карте из Экологического атласа бассейна оз. Байкала. Распределение типов почв по данным Экологического атласа бассейна оз. Байкала на территории Монголии полностью соответствует почвенной карте из Национального атласа Монголии. Метод определения по указанным данным гидрофизических характеристик почв, используемых в качестве параметров модели, описан в следующем разделе.

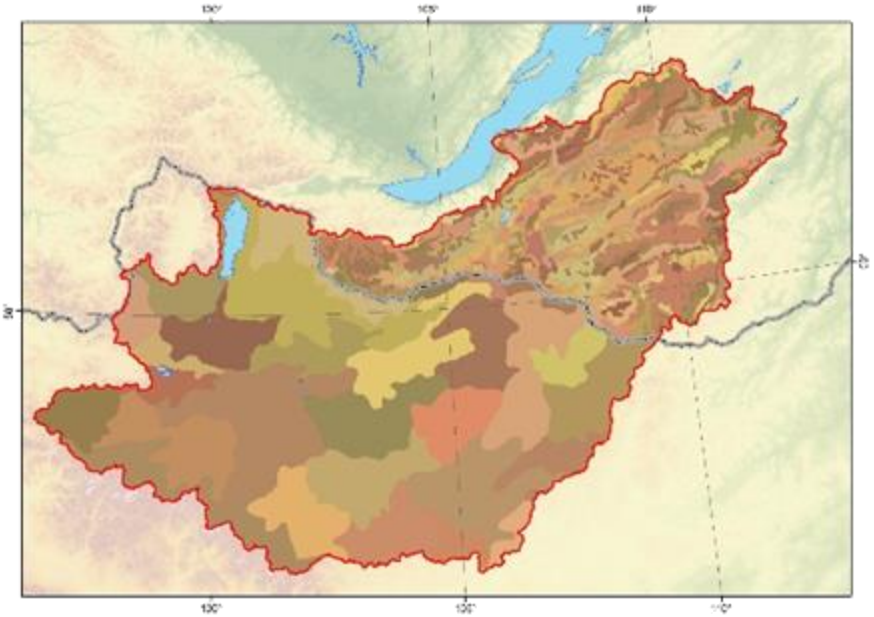

Рисунок 2.2.2 Карта почвенного покрова бассейна р. Селенги (HWSD)

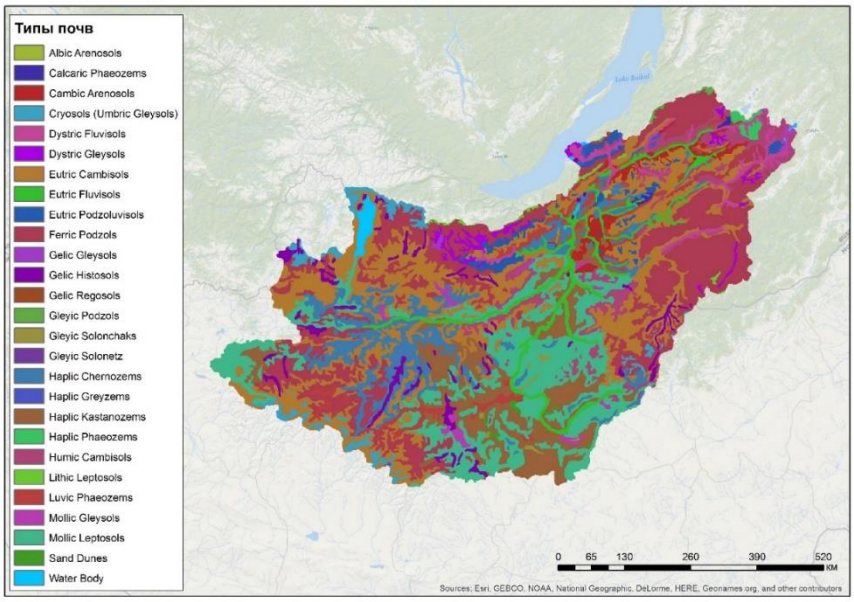

Рисунок 2.2.3 Адаптированная карта почвенного покрова бассейна р. Селенги

Глобальная база данных GLCC была создана при поддержке Геологической службы США (USGS), Университета штата Небраска и Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии. Глобальная база 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. В данной работе использовалась глобальная классификация, которая содержит 96 типов ландшафтов (Рис.2.2.4).

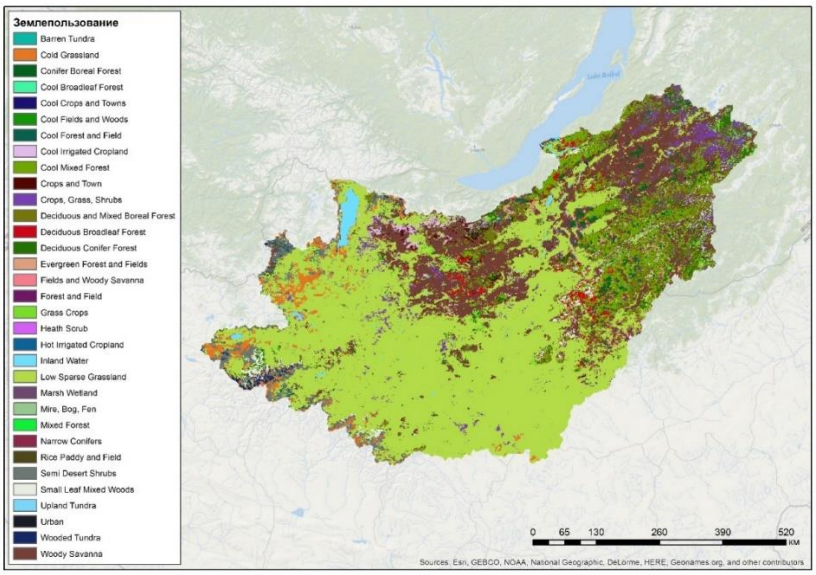

Рисунок 2.2.4 Карта типов землепользования в бассейне р. Селенги (GLCC)

Результирующие карты баз почв и землепользования представлены растровыми файлами с пространственным разрешением 1×1 км.

Базы исходной метеорологический информации, которую использовалась для задания входных данных, были подготовлены нами для всей территории бассейна р. Селенги на основе фактических данных, измеренных на 74 метеорологических станциях (20 из которых приходится на монгольскую часть бассейна) за 2000-2013 гг. (Рис.2.2.5) и данных метеорологического реанализа EWEMBI с пространственным разрешением $0.5^0 \times 0.5^0$ (495 узлов расчетной сетки) за период 1980-2013 гг. (Рис.2.2.6). Обе базы включают временные ряды среднесуточных значений температуры и влажности воздуха, суточных сумм осадков. База данных реанализа был создана на основе данных проекта ISI-MIP2b (Phase 2b of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) [Frieler et al., 2017].

Рисунок 2.2.5 Расположение метеорологических станций в бассейне р. Селенги и его окрестности и гидрометрических постов, данные по которым использовались для калибровки модели

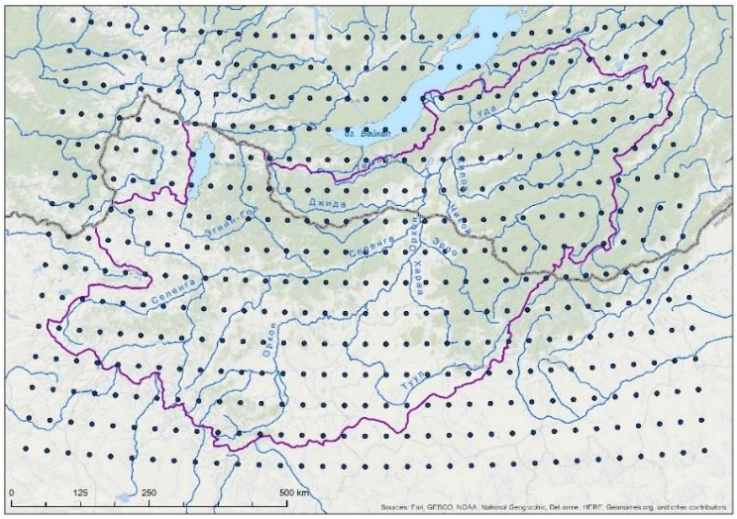

Рисунок 2.2.6 Узлы расчетной сетки реанализа EWEMBI с пространственным разрешением 0.5^0x0.5^0

Нами был создан архив данных о гидрологических характеристиках, который включает в себя информацию о суточных расходах воды на различных гидрометрических постах в бассейне Селенги (Рис.2.2.5, Табл.2.2.1).

Таблица 2.2.1 Основные характеристики гидрометрических постов, используемых в работе

Гидрометрический створ	Расстояние от устья, км	Использованный период наблюдений, годы	Число лет	Площадь, км^2
р. Селенга - с.Зуунбурэн	503	1980-2013	34	148000
р. Селенга - с.Новоселенгинск	273	1980-2013	34	360000
р. Селенга - рзд.Мостовой	127	1980-2013	34	440000
р. Селенга - с. Кабанск	43	1980-2013	34	445000

2.2.2 Схематизация бассейна р. Селенги и оценка параметров модели формирования речного стока

Схематизация бассейна р. Селенги, которая заключается в построении модельной речной сети и выделении расчетных элементов (частных водосборов), проводилась на основе цифровой модели рельефа 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. Каждой ячейке сетки присваивались соответствующие значения ее высоты (по рельефу), номера типов почв и ландшафтов. Далее 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.

Речная сеть, построенная по ЦМР HYDRO1k, сравнивается с фактической речной сетью на рисунке 2.2.7, из которого видно, что выбранное пространственное разрешение позволило с хорошей точностью описать структуру и конфигурацию речной сети бассейна р. Селенги.

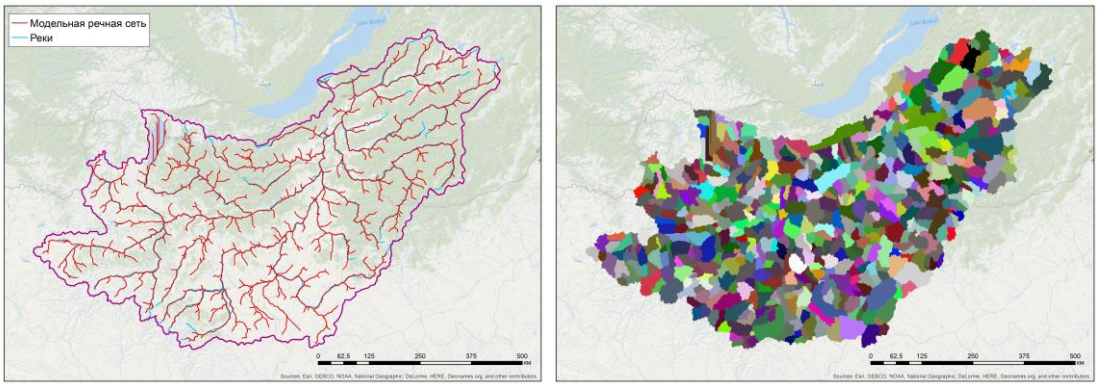

Рисунок 2.2.7 Модельная (красная) и фактическая (синяя) речная сеть (слева) и расчетные элементарные водосборы (справа) бассейна р. Селенги

Общее число используемых в модели построенных элементарных речных водосборов в бассейне Селенги – 675, средняя площадь – 660 км^2 (Рис.2.2.7). Каждый элементарный водосбор характеризуется набором модельных параметров по типам почв и ландшафтов; метеорологические характеристики интерполировались пропорционально обратной величине квадрата расстояния от ближайших 5-ти метеорологических станций.

Почвенно-гидрологические константы – наименьшая полевая влагоемкость почвы, влажность завядания, коэффициент вертикальной фильтрации, пористость – ключевые параметры модели ECOMAG. Некоторые из этих характеристик также используются как коэффициенты в формулах расчета теплофизических параметров модели (коэффициентов теплопроводности и теплоемкости) и, соответственно, влияют на расчеты промерзания и оттаивания почвы.

Данные измерений почвенно-гидрологических констант для почв российской части бассейна Селенги очень скудны, а для его монгольской части отсутствуют. Для их расчета использовались педотрансферные функции (“pedotransfer functions” – PTFs), по которым можно найти зависимости гидрофизических характеристик почв от их механических и структурных свойств, которые легко определяются. Использование PTFs основано на допущении, что водоудерживающая способность и влагопроводность почвы, зависят, в большей степени, от размера и плотности слагающих ее частиц, чем от генезиса и физико-географических условий территории. Это допущение позволяет перенести 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. Наибольшее развитие исследования PTFs получили именно в 1990-2000-х годах в связи с появлением общедоступных электронных баз данных, аккумулирующих множество измерений почвенных свойств в разных регионах. Одной из наиболее известных является база Продовольственной и сельскохозяйственной

организации ООН, UN FAO. Более подробный обзор существующих подходов применения PTFs к оценке почвенно-гидрологических констант дан в монографии [Гельфан, 2007].

Нами использован метод определения почвенно-гидрологических констант, являющихся параметрами модели, по данным о механическом составе почв, разработанный в работе [Калугин, 2016]. Для каждого из 27 типов почв в бассейне Селенги с применением педотрансферных функций (2.2.1-2.2.11), предложенных в работе [Saxton and Rawls, 2006], по данным процентного содержания песка, глины, гравия и органического вещества определялись: влажность завядания *WP* (мм), наименьшая полевая влагоемкость *FC* (мм), пористость *P* (см^3/см^3), объемная плотность ρ (г/см^3) и коэффициент фильтрации K_s (см/сут):

$$WP = \theta_1 + 0.14 \times \theta_1 - 0.02 \ , \tag{2.2.1}$$

$$FC = \theta_2 + (1.293 \times \theta_2^2 - 0.374 \times \theta_2 - 0.015), \tag{2.2.2}$$

$$P = FC + \theta_4 - 0.097 \times S + 0.043 \ , \tag{2.2.3}$$

$$\rho = (1 - P)2.65 \times (1 - R_v) + 2.65 R_v \ , \tag{2.2.4}$$

$$K_s = 1930(P - FC)^{(3-\lambda)} \ , \tag{2.2.5}$$

где K_s – коэффициент фильтрации (см/сут), *S, C, OM* – процентное содержание песка, глины и органического вещества в почве (%), R_v – объемная плотность гравия (г/см^3), λ, *B*, θ_1, θ_2, θ_3, θ_4 – параметры, определенные на основе данных о механическом составе по эмпирическим зависимостям:

$$\lambda = 1/B, \tag{2.2.6}$$

$$B = \frac{ln(1500) - ln(33)}{ln(FC) - ln(WP)} \ , \tag{2.2.7}$$

$$\theta_1 = -0.024S + 0.487C + 0.006OM + 0.005(S \times OM) - 0.013(C \times OM) + 0.068(S \times C) + 0.031 , \tag{2.2.8}$$

$$\theta_2 = -0.251S + 0.195C + 0.011OM + 0.006(S \times OM) - 0.027(C \times OM) + 0.452(S \times C) + 0.299 , \tag{2.2.9}$$

$$\theta_3 = 0.278S + 0.034C + 0.022OM + 0.018(S \times OM) - 0.027(C \times OM) + 0.584(S \times C) + 0.078 , \tag{2.2.10}$$

$$\theta_4 = \theta_3 + (0.636\theta_3 - 0.107) . \tag{2.2.11}$$

Помимо почвенно-гидрологических констант для каждого из 33 выделенных типов ландшафтов в бассейне Селенги определялись следующие параметры модели: коэффициенты вертикальной фильтрации и стаивания, испарения почвенной влаги и промерзания почвы.

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

В модели ECOMAG реализована следующая схема калибровки параметров модели [Мотовилов, 2016б]:

1. Бóльшая часть физически обоснованных параметров задается на основе баз данных о характеристиках подстилающей поверхности (рельеф, типы, механический состав и водно-физические характеристики почв, типы и характеристики растительности и землепользования). Каждый элементарный водосбор обладает своим набором типов почв, ландшафтов, высотным распределением, от которых зависят параметры модели.
2. Калибровка и корректировка отдельных параметров модели, ответственных за определенные процессы, проводятся по имеющимся данным наблюдений за соответствующими переменными (расходы воды в различных створах речной сети, поля характеристик снежного покрова, влажности почвы, уровень грунтовых вод).
3. Процедура калибровки организована таким образом, чтобы сохранить изначально заданные соотношения между значениями конкретного пространственно-распределенного параметра для выделенных на водосборе типов почв и характеристик ландшафтов, т.е. регулируется корректирующий множитель, а не абсолютные значения параметра. Это делается, чтобы сократить количество калибруемых параметров модели.

Полный список параметров модели ECOMAG приведен в Таблице 2.2.2.

Таблица 2.2.2. Перечень калибруемых параметров модели ECOMAG

№	**Параметры, зависящие от типа и механического состава почв**
1	*Объемная плотность почвы, кг/м^3*
2	*Пористость, м^3/ м^3*
3	*Наименьшая полевая влагоемкость, м^3/ м^3*
4	*Влажность завядания, м^3/ м^3*
5	*Коэффициент вертикальной фильтрации, м/с*
6	*Коэффициент горизонтальной фильтрации, м/с*
7	*Коэффициент теплопроводности, Дж/(м×с×^{O}С)*
	Параметры, зависящие от типа подстилающей поверхности
8	*Толщина почвенного горизонта А, м*
9	*Температурный коэффициент стаивания снега, м/с/^{O}С*
10	*Максимальное поверхностное задержание, м*
11	*Коэффициент шероховатости Маннинга для склонов, с/м$^{1/3}$*
	Общие параметры для водосбора
12	*Критическая температура для вида осадков (снег/дождь), ^{O}С*
13	*Критическая температура для начала таяния снега, ^{O}С*
14	*Параметр потенциального испарения, м/Мб*
15	*Коэффициент шероховатости Маннинга для русла, с/м$^{1/3}$*
16	*Высотный температурный градиент, ^{O}С/м*
17	*Высотный градиент по осадкам, м/м*

Выходными переменными модели являются распределенные по территории водосбора среднесуточные величины расходов воды в речных руслах, поверхностного склонового стока, подземного стока, характеристик снежного покрова, испарения, влажности почвы, уровня грунтовых вод.

Для калибровки параметров и проверки модели при сравнении фактических и расчетных данных характеристик гидрологического цикла используются различные критерии соответствия (или «эффективности») [Yilmaz et al., 2008; Wöhling et al., 2013; Thirel et al., 2015б; Huang et al., 2017]. При выборе этих критериев, в общем случае, необходимо учитывать особенности той задачи, для решения которой предназначена модель [Refsgaard et al., 2013]. Чаще всего используется стандартный критерий Нэша-Сатклиффа *NSE* [Nash and Sutcliffe, 1970] (2.2.12), который оценивает близость фактических и рассчитанных гидрографов стока по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{f(i)}^{j} - Q_{s(i)}^{j}\right)^2}{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{f(i)}^{j} - Q_{r(i)}^{j}\right)^2}, \qquad (2.2.12)$$

где $Q^j_{f(i)}$ и $Q^j_{s(i)}$ – фактические и рассчитанные значения расхода воды за i-й интервал времени (сутки, месяц, год) j-го года наблюдений, соответственно, (i=1, 2,…; j=1, 2,…,N), $Q^j_{r(i)}$ - расход, рассчитанный по так называемой референтной модели и обычно принимаемый равным постоянной величине $\overline{Q}$ (2.2.13):

$$Q^j_{r(i)} = \overline{Q} = \frac{1}{N \times n} \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{n} Q^j_{f(i)}\ , \qquad (2.2.13)$$

где $\overline{Q}$ - среднее значение расходов за период наблюдений. N - количество наблюдаемых лет; n - количество интервалов времени в течение года (для суточного n = 365/366, для месячного n = 12 и годового n = 1).

При калибровке также оценивалась систематическая ошибка расчета *BIAS* (2.2.14):

$$BIAS = \frac{Q^j_{f(i)} - Q^j_{s(i)}}{\overline{Q}} \times 100\%, \qquad (2.2.14)$$

Если рассчитанные и фактические значения расходов совпадают полностью, величина NSE равна единице. Если результаты расчетов показывают $NSE \leq 0$, дисперсия ошибок расчета больше дисперсии фактических расходов, т.е. модель неэффективна. Существуют разные предложения по назначению границ для критериев качества, которые носят субъективный характер [Krysanova et al., 2018]. В работе [Moriasi et al., 2015] предложили оценку качества расчетов в зависимости от сочетаний величин *NSE* и $BIAS$. При расчетах гидрографов среднесуточного стока результаты считаются хорошими, когда $0.70 \leq NSE \leq 1$ и $|BIAS| \leq 10\%$, удовлетворительными – при $0.50 \leq NSE < 0.70$ и $10\% < |BIAS| \leq 15\%$ и неудовлетворительными – при $NSE < 0.50$ и $|BIAS| > 15\%$.

Калибровка параметров разработанной региональной модели формирования стока бассейна р. Селенги проводилась для маловодного периода с 2000 по 2013 гг. по суточному стоку на 4 гидрометрических створах, расположенных на основном русле реки (Табл.2.2.3). Чтобы убедиться, что разработанная модель воспроизводит водный режим во время периода повышенной водности, необходимо использовать исторические данные за 1980-ые годы. Однако, при выполнении данной диссертационной работы в нашем распоряжении для всего бассейна р. Селенги была база, собранная по фактическим данным с метеорологических станций, лишь за 2000-2013 гг., поэтому встал вопрос об использовании других источников метеорологической информации. Как уже было сказано выше, нами был выбран метеорологический реанализ EWEMBI, поскольку он лучше скорректирован и воспроизводит годовой ход метеорологических характеристик в сравнении с фактическими данными за 2000-2013 гг., чем реанализ ERA-interim,

использованного, как уже было отмечено в Главе 1, ранее в других работах [Морейдо и Калугин, 2017; Karthe et al., 2017] (Рис.2.2.8).

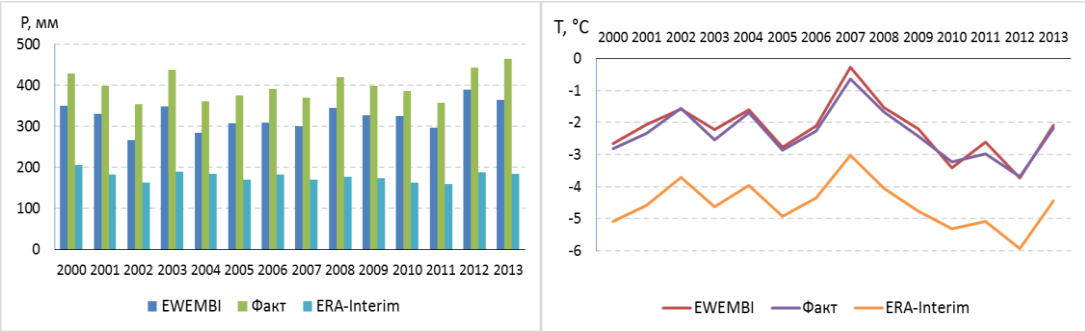

Рисунок 2.2.8 Годовой ход среднегодовой суммы осадков (слева) и температуры воздуха (справа) в бассейне р. Селенги за период 2000-2013 гг.

Таким образом, сначала в качестве входных данных использовалась база, собранная по фактическим данным метеорологических наблюдений. Далее при тех же подобранных параметрах модели, в качестве входных данных использовались данные реанализа. На рисунках 2.2.9-2.2.12 представлены фактические и рассчитанные суточные гидрографы, полученные по фактическим данным, измеренным на метеорологических станциях, и по данным метеорологического реанализа EWEMBI для четырех основных створов р. Селенги.

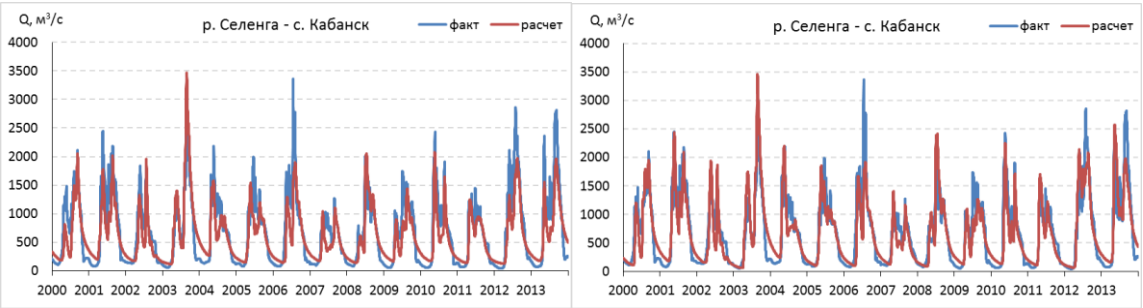

Рисунок 2.2.9 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений (слева) и по данным метеорологического реанализа EWEMBI (справа) суточные гидрографы р. Селенги в створе с. Кабанск

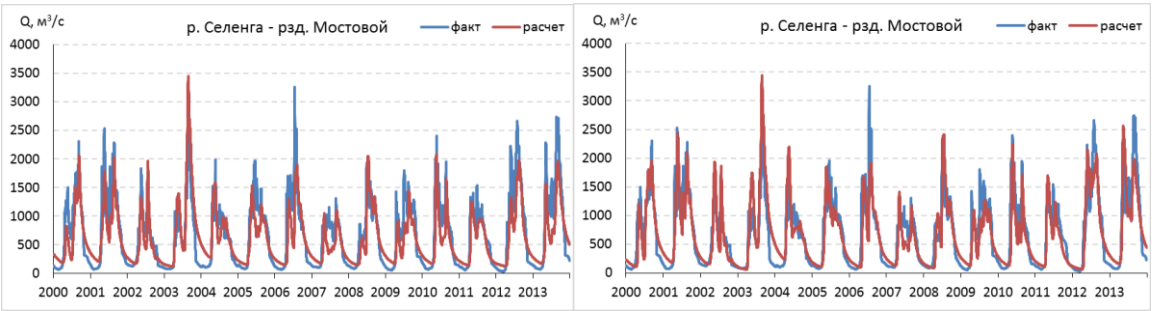

Рисунок 2.2.10 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений (слева) и по данным метеорологического реанализа EWEMBI (справа) суточные гидрографы р. Селенги в створе рзд. Мостовой

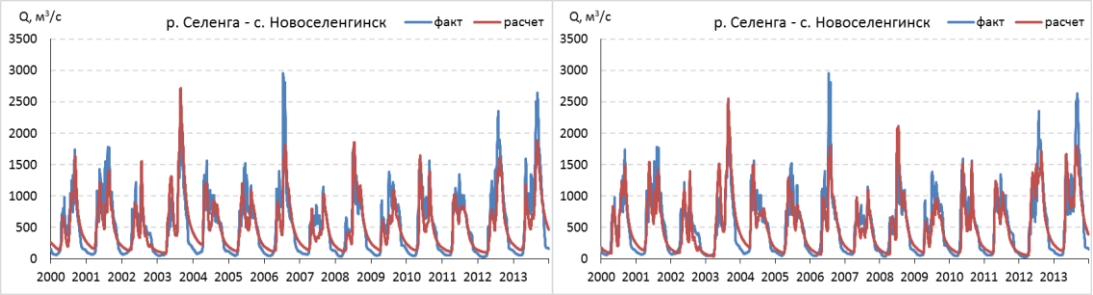

Рисунок 2.2.11 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений (слева) и по данным метеорологического реанализа EWEMBI (справа) суточные гидрографы р. Селенги в створе с. Новоселенгинск

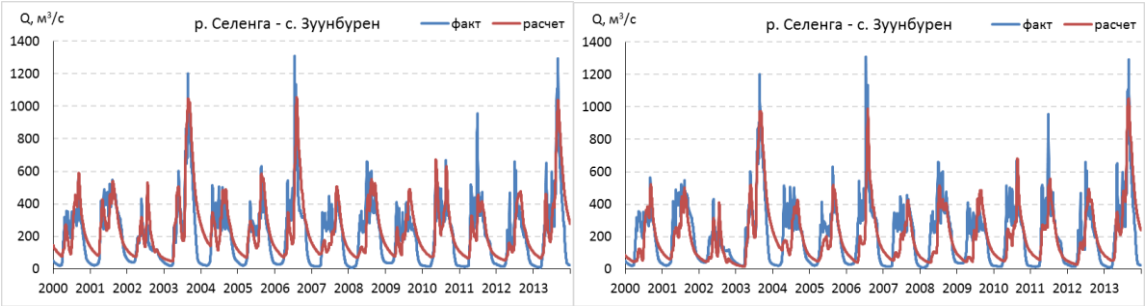

Рисунок 2.2.12 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений (слева) и по данным метеорологического реанализа EWEMBI (справа) суточные гидрографы р. Селенги в створе с. Зуунбурен

Согласно приведенным выше градациям критериев качества *NSE* и *BIAS* для трех гидрометрических створов получены хорошие или удовлетворительные результаты расчета суточных гидрографов, полученные по обоим типам входной метеорологической информации, при этом по данным метеорологического реанализа значения критериев качестве суточного стока в бассейне р. Селенги оказались лучше (Табл. 2.2.3). Для створа с. Зуунбурен, находящегося на территории Монголии, по обоим критериям результаты расчетов оказались хуже, но в целом удовлетворительными.

Таблица 2.2.3 Значения критерия эффективности расчета суточного стока в бассейне р. Селенги по данным наблюдений и метеорологического реанализа EWEMBI.

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

Результаты оценок показали, что чувствительность расчетных характеристик стока к типам входной информации мала. Таким образом, использование реанализа EWEMBI в качестве входных данных для ECOMAG возможно, т.к. позволило с удовлетворительной точностью рассчитать характеристики водного режима разного временного осреднения в различных створах речной сети. Заметим, что эти результаты получены без коррекции систематической ошибки данных реанализа (без т.н. bias-correction). Остальные результаты расчетов месячных и годовых величин стока рек по основным створам, полученные по фактическим метеорологическим данным, представлены в Приложении А. Так же стоит отметить, что в обоих случаях лучшие результаты получены для замыкающего створа с. Кабанск - с уменьшением площади водосбора качество расчетов ухудшается. Далее будут обсуждаться только результаты расчетов, полученные с использованием в качестве «входов» в гидрологической модели данных метеорологического реанализа.

Отметим, что калибровка модели формирования стока осуществлялась при одном наборе параметров для всего бассейна р. Селенги. Условия формирования стока в разных частях бассейна р. Селенги существенно отличаются, но разработанная модель позволила учесть эту неоднородность.

Кроме того, для каждого гидрометрического поста для характеристики точности модельных результатов была оценена степень тесноты связи рассчитанных и фактических объемов стока за месяц с помощью коэффициента детерминации R^2, меняющегося от 1 (функциональная связь) до 0 (отсутствие связи) за период калибровки (Табл.2.2.3, Рис.2.2.13). Для трех створов (российская часть бассейна) связь получилась высокой (0.83-0.85), в то время как для монгольской части бассейна (створ с. Зуунбурен) хуже – 0.71. Рисунки с месячными гидрографами для периода калибровки представлены в Приложении А.

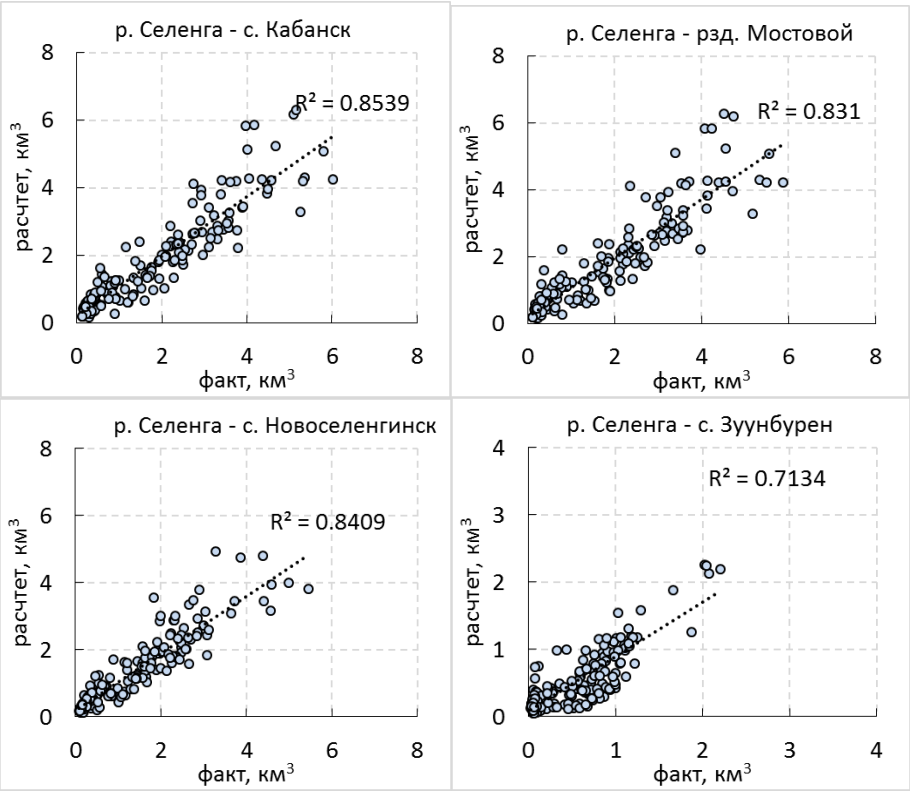

Рисунок 2.2.13 Связь фактических и рассчитанных по данным метеорологического реанализа месячных объемов стока в различных гидрометрических створах в бассейне р. Селенги за 2000-2013 гг.

Также было проведено сравнение фактических и смоделированных типовых среднемноголетних гидрографов, характеризующих внутригодовое распределение за калибровочный период (Рис.2.2.14).

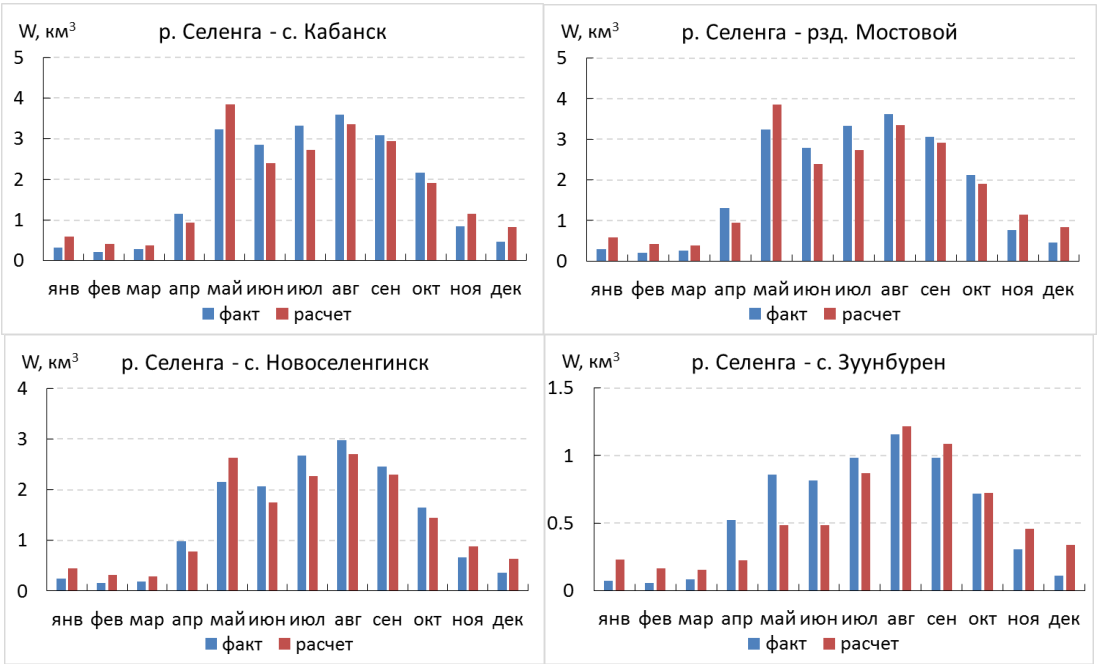

Рисунок 2.2.14 Фактическое и расчетное по данным метеорологического реанализа внутригодовое распределение стока для четырех гидрометрических створов р. Селенги за 2000-2013 гг.

Анализ графиков свидетельствует о удовлетворительном воспроизведении внутригодового хода объемов воды в створах р. Селенги за многолетний период калибровки, что подтверждает возможность использования модели для оценки характеристик водного режима.

Проверка модели для бассейна р. Селенги проводилась для тех же створов на независимых данных измерений за многоводный период с 1986 по 1999 гг. (Табл.2.2.3, Рис.2.2.15-2.2.18) при тех же параметрах модели.

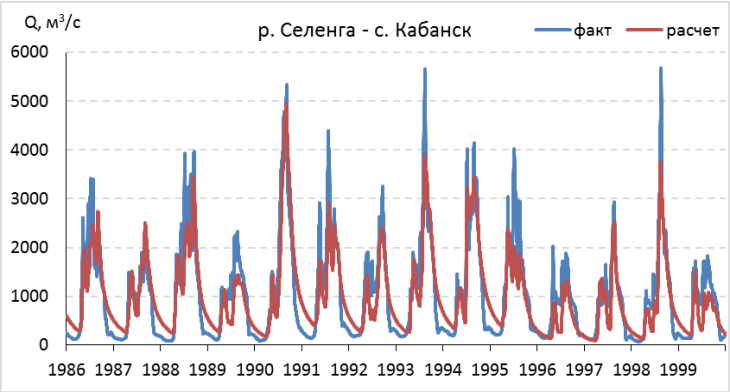

Рисунок 2.2.15 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа суточные гидрографы р. Селенги в створе с. Кабанск за 1986-1999 гг.

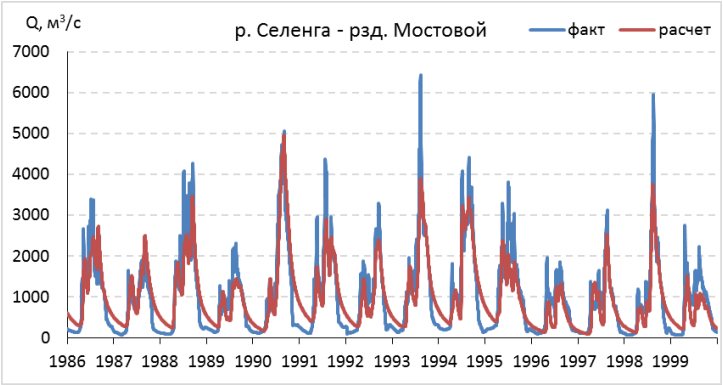

Рисунок 2.2.16 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа суточные гидрографы р. Селенги в створе рзд. Мостовой за 1986-1999 гг.

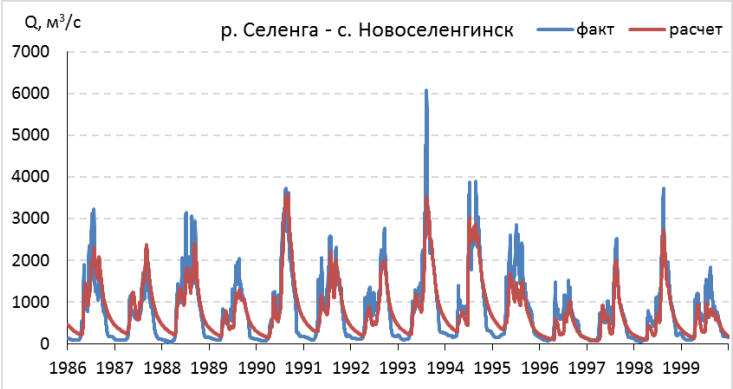

Рисунок 2.2.17 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа суточные гидрографы р. Селенги в створе с. Новоселенгинск за 1986-1999 гг.

Рисунок 2.2.18 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа суточные гидрографы р. Селенги в створе с. Зуунбурен за 1986-1999 гг.

Для каждого створа также была оценена степень тесноты связи рассчитанных и фактических объемов стока за месяц с помощью коэффициента детерминации R^2 за период верификации (Рис.2.2.19). Для трех створов (российская часть бассейна) связь также получилась высокой (0.84), в то время как для монгольской части бассейна (створ с. Зуунбурен) хуже – 0.68.

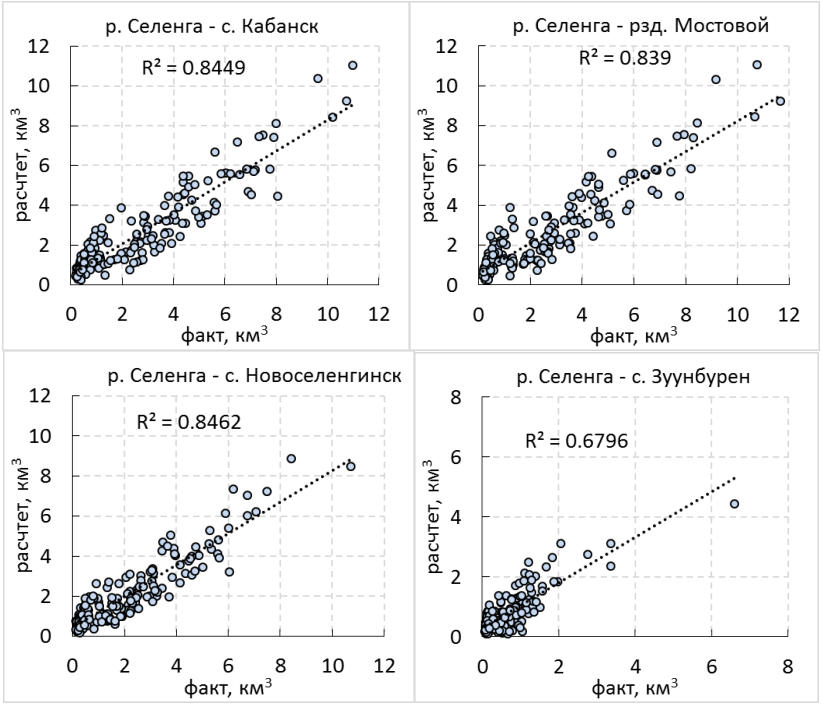

Рисунок 2.2.19 Связь фактических и рассчитанных по данным метеорологического реанализа месячных объемов стока в различных гидрометрических створах в бассейне р. Селенги за 1986-1999 гг.

Дополнительно была проведена оценка качества воспроизведения максимальных расходов за паводковый период в течение июля-сентября для четырех створов за период 1986-2013 гг. (Рис.2.2.20). Коэффициент детерминации R^2 для максимальных расходов воды получился от 0.67 до 0.78, при этом наибольшее значение R^2 получилось для створа

с. Зуунбурен. Рисунки с месячными гидрографами для периода верификации представлены в Приложении А.

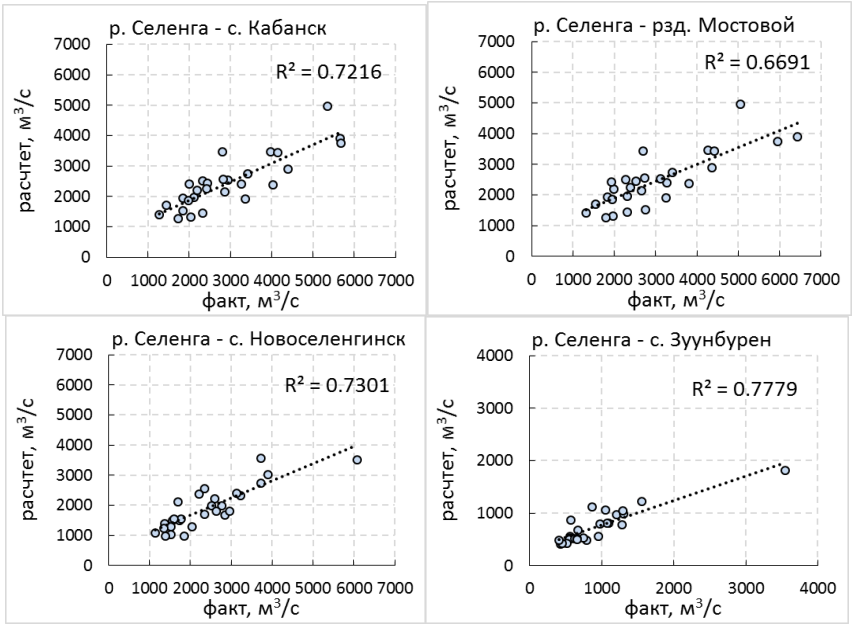

Рисунок 2.2.20 Связь фактических и рассчитанных по данным метеорологического реанализа максимальных расходов воды в различных гидрометрических створах в бассейне р. Селенги за 1986-2013 гг.

Анализ графиков свидетельствует о хорошем воспроизведении стока в четырех створах р. Селенги за многолетний период, что подтверждает возможность использования модели для оценки многолетних изменений характеристик водного режима.

Таким образом, при переходе от калибровочного периода к проверочному, стандартные критерии эффективности *NSE* и *BIAS* по отдельным створам демонстрируют малую чувствительность. Этот результат свидетельствует об отсутствии зависимости параметров от климатических условий калибровочного периода, что является необходимым условием ее робастности.

В ряде работ показано (см. обзор в [Gupta et al., 2009]), что стандартный критерий *NSE* (формулы 2.2.12, 2.2.13) предъявляет заниженные требования к качеству гидрологической модели: чтобы быть эффективной (*NSE*>0), модель должна всего лишь давать больше информации по сравнению с «наивной» референтной моделью (2.2.13), которая представляет собой среднемноголетнее значение искомой величины. Возможность «ужесточить» критерий Нэша-Сатклиффа связана с использованием более сложной референтной модели. Если конструировать такую модель только из наблюденных данных, то очевидный шаг в сторону её усложнения – референтная модель, описывающая внутригодовую или межгодовую климатическую изменчивость характеристик речного стока. В работе [Garrick et al., 1978] авторы предложили первую

референтную модель такого рода в виде климатического среднемноголетнего гидрографа, который рассчитывался как:

$$Q^{j}_{r(i)} = Q_{\text{season(i)}} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} Q^{j}_{f(i)}\,, \qquad (2.2.15)$$

i=1, 2,…, 365(366); j=1, 2, 3,…, N

Эта модель (2.2.15) была рекомендована ВМО для оценки качества моделей формирования талого стока [World Meteorological Organization, 1986]. В работах [Seibert, 2001; Schaefli et al., 2005] показано, что использование такой референтной модели резко повышает требования к тестируемой гидрологической модели.

Мы модифицировали референтную модель (2.2.15) с тем, чтобы использовать ее для анализа качества моделирования не только среднесуточных, но также среднеднемесячных и среднегодовых расходов воды. Результаты, описанные ниже, приведены в статье [Gelfan and Millionshchikova, 2018].

При оценке качества расчета среднемесячных расходов воды индекс i в формуле (2.2.15) изменяется от 1 до 12. Для среднегодовых расходов референтная модель записывается как модель линейного тренда:

$$Q^{j}_{r(i)} = Q^{j}_{\text{trend}} = a + bj\,, \qquad (2.2.16)$$

где a и b – коэффициенты линейного тренда; i=1; j=1, 2, 3,…, N

Оценки качества расчетов расходов воды р. Селенги за весь период моделирования 1980-2013 гг. с разным временным осреднением (сутки, месяц, год) по критерию *NSE* (2.2.12) при использовании референтных моделей (2.2.15 и 2.2.16) представлены в таблице 2.2.4. Здесь же для сравнения даны оценки по стандартной формуле (2.2.13).

Таблица 2.2.4 Критерий эффективности *NSE* расчета расходов воды разного временного осреднения за период 1980-2013 гг. с использованием усложненных референтных моделей (2.2.15)-(2.2.16). В скобках указаны значения *NSE* при стандартной реферетной модели (2.2.13)

Гидрометрический створ	$Q^{j}_{r(i)} = Q_{\text{season(i)}}$		$Q^{j}_{r(i)} = Q^{j}_{\text{trend}}$
	Сутки	Месяц	Год
р. Селенга - с. Кабанск	0.46 (0.81)	0.51 (0.84)	0.74 (0.79)
р. Селенга - рзд. Мостовой	0.38 (0.79)	0.50 (0.84)	0.76 (0.80)
р. Селенга - с. Новоселенгинск	0.47 (0.80)	0.52 (0.85)	0.71 (0.77)
р. Селенга - с. Зуунбурен	0.22 (0.59)	0.22 (0.65)	0.65 (0.68)

Как видно из таблицы 2.2.4, критерий *NSE*, полученный с использованием усложненных критериев эффективности, оказался положительным при расчетах

многолетних рядов стока. При этом для суточных и месячных гидрографов эффективность модели формирования стока существенно понизилась по сравнению с использованием стандартного критерия *NSE*. Для среднесуточных расходов среднее для 4-х створов значение более «жесткого» *NSE* оказалась на 0.37 ниже, чем при использовании стандартного *NSE*. Для среднемесячных расходов стока это снижение эффективности модели оказалось равным 0.36. То есть в среднем по 4-м створам значения *NSE* снизились без малого в 2 раза. При расчете среднегодовых расходов воды это снижение также проявилось, хотя и не столь заметно. Полученные результаты показали, что использование более «жестких» реферетных моделей (2.2.15, 2,2,16) резко повышает требования к тестируемой гидрологической модели, по сравнению с использованием стандартной референтной модели (2.2.13). Эти значения определяют минимальный уровень качества, ниже которого модель становится неэффективной.

В целом, эффективность модели получилась приблизительно одинаковой для трех створов, расположенных в нижнем течении реки, но существенно снижается для створа Зуунбурен в среднем течении, т.е. модель с меньшей точностью описывает водный режим рек в верхней – монгольской части бассейна. Полученный результат можно объяснить меньшей надежностью данных реанализа EWEMBI в этой части водосбора из-за слабой освещенности метеорологической информацией монгольской части бассейна.

Снижение критерия эффективности *NSE* при использовании усложненной референтной модели годовых расходов воды означает, что в период 1980-2013 гг. для всех створов проявляется линейный тренд, который описывает часть вариации соответствующих фактических значений расходов воды. На рисунке 2.2.21 сопоставлены тренды наблюденных и смоделированных последовательностей среднегодовых расходов воды для указанных гидрометрических створов.

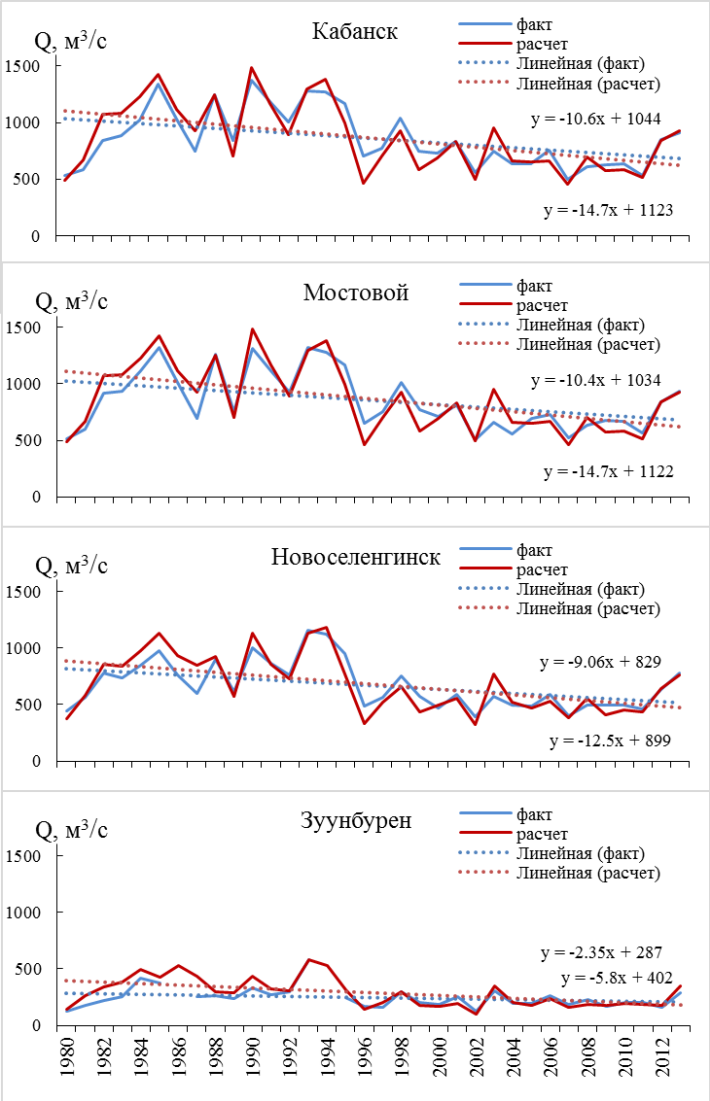

Рисунок 2.2.21 Изменения фактических (синяя линия) и рассчитанных (красная линия) величин годового стока в различных створах р. Селенги за 1980-2013 гг. Пунктиром соответствующего цвета показаны линии тренда.

Нами были сопоставлены также тренды в рядах фактических и рассчитанных среднесезонных расходов воды за период 1980-2013 гг. Результаты сопоставления для 4-х рассматриваемых створов представлены в таблице 2.2.5.

Таблица 2.2.5 Уклоны (м^3/с в год) линий тренда в наблюденных и рассчитанных последовательностях среднегодовых и среднесезонных расходов воды р. Селенги

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

Как видно из рисунка 2.2.21 и таблицы 2.2.5, модель позволила воспроизвести многолетнюю тенденцию уменьшения годового стока во всех рассматриваемых створах р. Селенги. При этом модель несколько 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 $м^3/с$ за десятилетие, а по рассчитанным данным – порядка 120 $м^3/с$ за десятилетие.

Расчеты показали, что в расчетных величинах сезонного стока проявляется та же тенденция, что и в соответствующих наблюденных величинах, а именно, снижение стока за рассматриваемый период стока во всех створах. По данным наблюдений с наибольшей скоростью происходит снижение летнего и осеннего стока, с наименьшей – весеннего и зимнего стока, что также подтверждается расчетами по модели. 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 наблюденных, так и для рассчитанных рядов стока, она составила, в среднем, порядка 200-210 $м^3/с$ 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.

2.3 Оценка робастности модели формирования стока р. Селенги по отношению к изменению климатических параметров

2.3.1 Постановка задачи

Надежность оценок гидрологических последствий изменения климата зависит не только от способности модели к воспроизведению наблюдаемых изменений водного режима, но и от ее робастности (устойчивости, малой чувствительности) к изменению климатических параметров, 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]. Ниже описаны результаты наших исследований, направленных на оценку робастности разработанной модели формирования стока р. Селенги по отношению к изменению климатических параметров.

В работе [Klemeš, 1986] была впервые предложена иерархическая процедура тестирования гидрологических моделей, предназначенных для решения задач за пределами (пространственными или временными) имеющихся данных наблюдений, которые используются для калибровки модели. В рамках предложенной процедуры автор [Klemeš, 1986] разработал так называемый DSS-тест (Differential Split-Sample test), предназначенный для оценки возможных гидрологических последствий изменения климата. Тест состоит в следующем: из имеющегося ряда наблюдений за речным стоком выделяются две непоследовательные календарные выборки данных о стоке за годы, контрастные по метеорологическим характеристикам: например, две выборки значений стока в годы с осадками выше и ниже нормы («влажные» и «сухие» годы). После этого калибровка модели проводится по первой выборке, а независимая проверка - по другой. Таким образом, DSS-тест позволяет имитировать с помощью имеющихся данных наблюдений «целевые» условия применения гидрологической модели в изменившихся климатических условиях и оценить ее робастность по отношению к изменению климатических параметров. Считается, что гидрологическая модель успешно «прошла» тест и робастна, если для калибровочного и проверочного рядов получены удовлетворительные по принятым критериям качества (например, по критерию *NSE*) результаты расчетов, и при этом полученные критерии оказались близкими для обоих

рядов. DSS-тест существенно более сложный для его «прохождения» моделью по сравнению с традиционно применяемым в гидрологическом моделировании SS-тестом (Split-Sample test), в котором имеющийся ряд данных делится на две выборки, вне зависимости от метеорологических условий (SS-тест применен нами в разделе 2.2.3). Различные модификации DSS-теста, а также другие процедуры проверки гидрологической модели предложены в [Ewen and Parkin, 1996; Euser et al., 2013; Thirel at al, 2015а,б; Gelfan et al., 2015а]. Мы разработали модифицированый DSS-тест и применили его для оценки робастности откалиброванной модели формирования стока р. Селенги по отношению к изменению климатических параметров.

2.3.2 Процедура оценки робастности

Алгоритм разработанного нами модифицированного DSS-теста состоит в следующем. По данным реанализа EWEMBI за 1980-2013 гг. выделялись четыре непоследовательные календарные выборки данных, контрастных по метеорологическим характеристикам. Отмечались года, когда годовые значения температуры воздуха T^{j}_{annual} и суммы осадков P^{j}_{annual} были больше или меньше среднемноголетних значений (T_{cl} and P_{cl},, соответственно) за 1980-2013 гг. для всего бассейна р. Селенги (Рис.2.3.1), тем самым четыре выборки включали в себя:

- WW - теплые (warm) и влажные (wet) года; $T^{j}_{\text{annual}} > T_{cl}$ и $P^{j}_{\text{annual}} > P_{cl}$
- CW - холодные (cold) и влажные (wet) года; $T^{j}_{\text{annual}} < T_{cl}$ и $P^{j}_{\text{annual}} > P_{cl}$
- WD - теплые (warm) и сухие (dry) года; $T^{j}_{\text{annual}} > T_{cl}$ и $P^{j}_{\text{annual}} < P_{cl}$
- CD - холодные (cold) и сухие (dry) года; $T^{j}_{\text{annual}} < T_{cl}$ и $P^{j}_{\text{annual}} < P_{cl}$

Рисунок 2.3.1. Годовые и среднемноголетние значения температуры воздуха и суммы осадков за 1980-2013 гг. для бассейна р. Селенги.

Выборка WW-лет включала 6 лет (1990, 1994, 1998, 2003, 2008, 2013); выборка CW-лет – 10 лет (1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1988, 1991, 1993, 2000, 2012); выборка WD-лет - 11 лет (1989, 1992, 1995, 1996, 1997, 1999, 2001, 2002, 2004, 2006, 2007); и выборка CD-лет - 6 лет (1980, 1981, 1987, 2005, 2010, 2011).

По результатам расчета гидрографов среднесуточного стока с помощью откалиброванной модели (см. предыдущий раздел) для каждой выборки лет оценивался стандартный критерий *NSE* (формулы (2.2.12, 2.2.13). Соответственно, было рассчитано четыре значения NSE: NSE_1 – для теплых (warm) и влажных (wet) лет; NSE_2 – для холодных (cold) и влажных (wet) лет, NSE_3 – для теплых (warm) и сухих (dry) лет; и NSE_4 – для холодных (cold) и сухих (dry) лет. Гидрологическая модель считается робастной и, соответственно, может быть использована для оценки гидрологических последствий изменений климата, если все различия $\mathrm{NSE}_i - \mathrm{NSE}_j$ (i,j=1,…,4; $i>j$) в статистическом смысле не значимы.

Для оценки статистической значимости указанных различий мы предложили следующий статистический тест [Gelfan, Millionshchikova, 2018]. Значения критерия *NSE* – случайные величины, статистические характеристики которых зависят от вероятностных свойств рядов фактических и смоделированных расходов [Murphy, 1988]. Предположим, что *NSE* – это нормально распределенная случайная величина со средним значением $M\left[\mathrm{NSE}\right]$ и дисперсией $\mathrm{Var}\left[\mathrm{NSE}\right]$. Нулевая гипотеза заключается в том, что различия в значениях *NSE* между двумя выборками (климатическими периодами) NSE_* и NSE_{**} статистически не значимы. Считая, что случайные величины статистически независимы, введем следующий критерий (z-тест):

$$Z_{\mathrm{NSE}} = \frac{\left|M\left[\mathrm{NSE}_*\right] - M\left[\mathrm{NSE}_{**}\right]\right|}{\sqrt{\mathrm{Var}\left[\mathrm{NSE}_*\right] + \mathrm{Var}\left[\mathrm{NSE}_{**}\right]}}, \tag{2.3.1}$$

Нулевая гипотеза принимается при уровне значимости α, если:

$$\Phi\left(Z_{\mathrm{NSE}}\right) < 1 - \alpha/2, \tag{2.3.2}$$

где $\Phi(x)$- интегральная функция распределения стандартного нормального распределения, α - уровень значимости, принимаемый в дальнейшем равным 5%.

Предположим, что для i-ого климатического периода $M\left[\mathrm{NSE}\right] = \mathrm{NSE}_i$ и $\mathrm{Var}\left[\mathrm{NSE}\right] = \sigma_i^2$. Тогда, согласно (2.3.1)-(2.3.2), разница между двумя независимыми оценками статистически не значима (при уровне значимости α), если:

$$\Phi\left(Z_{ij}\right) < 1 - \alpha/2, \tag{2.3.3}$$

где

$$Z_{ij} = \frac{\left|\mathrm{NSE}_i - \mathrm{NSE}_j\right|}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}}, \; i,j=1,\ldots,4;\; i>j \qquad (2.3.4)$$

Оценка выборочной дисперсии критерия Нэша-Сатклиффа σ^2_{NSE} для i-го климатического периода определяется по формуле:

$$\sigma^2_{\mathrm{NSE}} = \frac{4}{N}\left[\left(\rho-\alpha\right)^2\alpha^2 + N\alpha^2\left(\frac{1-\rho^2}{N-2}\right) + \beta^2\left(\alpha^2+\beta^2+1\right)\right], \qquad (2.3.5)$$

где ρ - коэффициент корреляции Пирсона между смоделированным и фактическим расходами; $\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_f}$, σ_s и σ_f – среднеквадратическая ошибка ряда смоделированных и фактических расходов соответственно; $\beta = \frac{\mu_s - \mu_f}{\sigma_f}$; μ_s и μ_f - математическое ожидание ряда смоделированных и фактических расходов, соответственно; N – длина выборки.

Вывод формулы (2.3.5) сделан нами и приведен в Приложении Б.

Предполагается, что модифицированный DSS-тест успешно пройден тогда и только тогда, когда условие (2.3.3) выполняется для всех различий между значениями NSE, оцененными для четырех контрастных по климатическим параметрам периодов, т.е. для всех шести комбинаций $\mathrm{NSE}_i - \mathrm{NSE}_j$ (i, j = 1, … , 4; $i > j$).

2.3.3 Результаты оценки робастности

Результаты прохождения модифицированного DSS-теста для оценки робастности разработанной модели формирования стока р. Селенги представлены в таблице 2.3.1.

Как видно из приведенных результатов, модель успешно прошла разработанный тест для среднемесячных и среднегодовых расходов воды во всех 4-х створах. Иными словами, модель показала статистически близкие результаты расчета измеренных и рассчитанных расходов воды указанного временного разрешения для климатически контрастных периодов, что свидетельствует о ее достаточной робастности по отношению к изменению климатических параметров. В то же время, хотя разница между значениями NSE, оцененных для суточных гидрографов не слишком велика (например, максимальная разница составляет только 0.11 для замыкающего створа с. Кабанск (см. Табл.2.3.1)), но модифицированный DSS-тест при этом оказался не пройден, т.е. модель оказалась недостаточно робастной для суточных данных. Причиной этого является небольшая выборочная дисперсия, рассчитанная по формуле (2.3.5), значений *NSE* которая, в свою очередь, обусловлена большим размером выборки для расходов суточного разрешения.

Таким образом, предложенный нами модифицированный DSS-тест показал, что разработанная модель формирования стока в бассейне р. Селенги не чувствительна (робастна) к изменению климатических параметров и может быть использована для оценки влияния изменений климата на годовой и месячный сток в разных частях бассейна исследуемой реки.

Таблица 2.3.1 Значения критерия Нэш-Сатклиффа (NSE) (формулы (2.2.12-2.2.13) и их выборочные стандартные отклонения (2.3.5). Результаты статистической проверки робастности модели (2.3.1), проведенной для контрастных по метеорологическим характеристикам периодов. Закрашенные ячейки выделяют те результаты, для которых условие (2.3.3) не выполнено.

Климатический период	Критерии	Кабанск			Новоселенгинск			Мостовой			Зуунбурен		
		сутки	месяц	год	сутки	месяц	год	сутки	месяц	год	сутки	месяц	год
		Критерий Нэш-Сатклиффа NSE											
WW	NSE_1	0.86	0.89	0.80	0.85	0.88	0.75	0.83	0.86	0.67	0.62	0.63	-2.52
CW	NSE_2	0.79	0.83	0.61	0.81	0.86	0.71	0.80	0.85	0.77	0.66	0.70	0.70
WD	NSE_3	0.75	0.78	0.55	0.74	0.78	0.64	0.73	0.78	0.66	0.44	0.48	0.38
CD	NSE_4	0.78	0.84	-0.40	0.73	0.79	-2.64	0.74	0.81	-1.76	0.19	0.19	-3.59
		Стандартное отклонение NSE (формула 2.3.5)											
WW	σ_1	0.015	0.079	0.466	0.016	0.081	0.533	0.017	0.090	0.605	0.032	0.187	4.118
CW	σ_2	0.013	0.065	0.486	0.012	0.060	0.435	0.012	0.060	0.380	0.017	0.093	0.437
WD	σ_3	0.012	0.065	0.497	0.012	0.063	0.426	0.012	0.064	0.397	0.023	0.128	0.681
CD	σ_4	0.020	0.093	1.953	0.022	0.109	4.324	0.021	0.099	3.078	0.168	0.283	4.526
		Результаты статистической проверки робастности (формулы 2.3.3, 2.3.4)											
	Z_{21}	3.527	0.586	0.282	2.000	0.198	0.058	1.442	0.092	0.140	1.104	0.335	0.778
	Z_{31}	5.726	1.075	0.367	5.500	0.975	0.161	4.806	0.724	0.014	4.568	0.662	0.695
	Z_{41}	3.200	0.410	0.598	4.411	0.663	0.778	3.331	0.374	0.775	2.514	1.297	0.175
	Z_{32}	2.261	0.544	0.086	4.125	0.920	0.115	4.125	0.798	0.200	7.692	1.390	0.395
	Z_{42}	0.419	0.088	0.502	3.192	0.563	0.771	2.481	0.346	0.816	2.783	1.712	0.943
	Z_{43}	1.286	0.529	0.471	0.399	0.079	0.755	0.413	0.254	0.780	1.474	0.934	0.867
		Модифицированный DSS-тест пройден (модель робастна)?											
	$\Phi\left(Z_{ij}\right) < 1-\alpha/2$ $(i,j=1,\ldots,4;\ i>j)$	Нет	Да	Да	Нет	Да	Да	Нет	Да	Да	Нет	Да	Да

Глава 3. Анализ чувствительности гидрологической системы бассейна р. Селенги к изменению климатических параметров с использованием метеорологических данных за исторический период

В оценке влияние изменения климата на речной сток выделяются два подхода [Gelfan et al., 2015б].

Первый подход объединяет эмпирические методы, основанные на обработке данных гидрометеорологических наблюдений в речном бассейне. Среди них можно выделить методы анализа временных рядов характеристик стока [см., например, Bates et al., 2008; Blöschl et al., 2017; Dzhamalov et al., 2015], анализа чувствительности характеристик стока к изменениям климатических параметров с использованием индексов «эластичности» [Sankarasubramanian et al., 2001; Vano and Lettenmaier, 2014; Hasan et al., 2018] и методы построения связей пространственных и временных изменений стока («trading space for time») [Peel and Blöschl, 2011; Singh et al., 2011]. В эмпирических оценках чувствительности стока к изменению климата присутствует значительная неопределенность, которая связана с пространственно-временной изменчивостью и сильной нелинейностью процессов формирования стока.

Второй подход объединяет методы, при которых используются модели гидрологического цикла суши, «входами» в которые задаются искусственные сценарии гидрометеорологических воздействий на речной водосбор. Искусственные сценарии создаются двумя способами: (1) путем трансформации имеющихся метеорологических данных - «delta-change transformation» [Gelfan et al., 2017], «power transformation» [Driessen et al., 2010], (2) либо по данным расчетов, полученных с помощью глобальных (GCMs) и региональных моделей климата (RCMs) [Krysanova et al., 2017; 2018].

Оценки возможных изменений стока крупных рек с помощью гидрологических моделей, в которых граничные условия задаются по данным расчетов, полученных с помощью моделей климата, в последние годы получают все большее распространение, что связано с совершенствованием региональных гидрологических моделей, увеличением пространственного разрешения моделей климата до характерных масштабов изменчивости гидрологических процессов, увеличением производительности климатических моделей [IPCC, 2013]. Однако и этим оценкам свойственная значительная неопределенность, которая в большей степени связана с изменчивостью рассчитанных по моделям климата данных и с неопределенностью будущих климатических сценариев, чем с неопределенностью гидрологического моделирования [Gelfan et al., 2015б].

На этом фоне особую актуальность приобретают исследования, которые направлены на анализ чувствительности гидрологических систем к изменению климатических параметров. Использование физико-математических моделей гидрологического цикла речного бассейна позволяет расширить возможности получения физически обоснованных оценок

чувствительности гидрологических систем речных бассейнов к изменению климата [Кучмент и др., 1990].

Данная глава посвящена исследованию 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, названный в англоязычной литературе “delta-change method” (далее “DC-метод”), подробно описанный в следующем разделе.

Глава построена следующим образом. В начале описана процедура проведения численных экспериментов для оценки чувствительности характеристик речного стока к изменению климатических параметров, затем дан анализ чувствительности характеристик и показателей вариации годового и максимального стока на основе разработанной модели формирования стока бассейна р. Селенги, и в конце по результатам этих численных экспериментов дан анализ изменений внутригодового распределения стока вследствие изменения климатических параметров.

3.1 Процедура оценки чувствительности

Суть DC-метода – в построении искусственных рядов метеорологических переменных путем внесения в соответствующие наблюденные метеорологические ряды малых постоянных возмущений, которые соответствуют возможным (прогнозируемым) изменениям климатических норм, и оценке с помощью гидрологической модели аномалий характеристик стока, обусловленных этими возмущениями. Алгоритм применения DC-метода для анализа чувствительности характеристик стока р. Селенги к возможным изменениям климата заключается в следующем. Среднесуточные значения осадков ΔP и температуры воздуха ΔT в бассейне р. Селенги, задаваемые по данным метеорологического реанализа EWEMBI за период 1986-2013 гг. (i – номер суток, начиная с 1 января 1986 г.), изменялись на постоянный множитель ΔP и на постоянную величину ΔT соответственно в каждом из 495-ти узлов пространственной сетки данных реанализа, покрывающей исследуемый водосбор. В результате для каждого узла были получены трансформированные ряды ежесуточных значений температуры воздуха $T_i^* = T_i + \Delta T$ и осадков $P_i^* = P_i \times \Delta P$. Для получения ряда трансформированных среднесуточных значений дефицита влажности воздуха D^* по данным реанализа была подобрана экспоненциальная зависимость среднесуточных значений дефицита влажности D_i от температуры воздуха T_i за период 1986-2013 гг. (Рис 3.1.1), а затем с помощью этой зависимости по трансформированным значениям T_i^* рассчитывались искомые значения D_i^*.

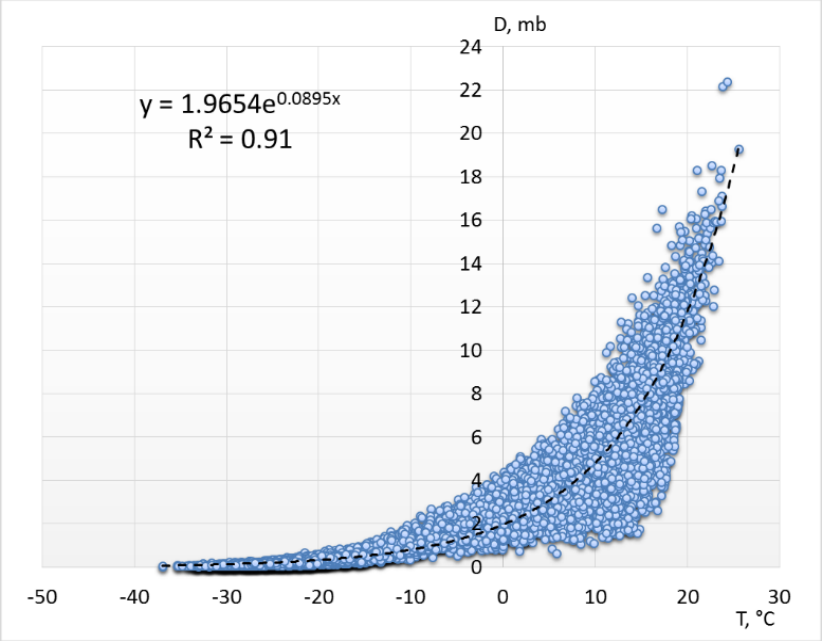

Рисунок 3.1.1 Зависимость среднесуточных значений дефицита влажности воздуха от среднесуточной температуры воздуха в бассейне р. Селенги, построенная по данным метеорологического реанализа EWEMBI за период 1986-2013 гг.

Рассчитанные описанным выше способом DC-трансформированные ряды среднесуточных значений температуры воздуха, осадков и дефицита влажности воздуха задавались на входе гидрологической модели, с помощью которой рассчитывались многолетние гидрографы стока р. Селенги, соответствующие разным сочетаниям ΔT и ΔP. Численные эксперименты проводились для 6-ти значений ΔT (0°C; 0.5°C; +1°C; 1.5°C; +2°C; +3°C) и 5-ти значений ΔP (-10%; -5%; 0%; +5%; +10%). В результате получилось 30 сценариев возможных изменений климатических параметров. По рассчитанным для каждого сценария гидрографам стока определялись 30 норм характеристик водного режима р. Селенги, для которых затем проводился анализ их чувствительности к задаваемым изменениям климатических параметров.

Эта методика локальной оценки чувствительности характеристик стока к возможным изменениям климата применялась для бассейнов рек Амур, Лена и Маккензи и описана в работах [Gelfan et al., 2017; Гельфан и др., 2018].

Анализ чувствительности характеристик стока к изменениям климатических параметров проводился следующим образом. По рассчитанным 30-ти значениям характеристик стока определялись аномалии этих характеристик – отклонение их норм от соответствующих значений, рассчитанных по исходным (не трансформированным) данным реанализа за период 1986-2013 гг. (см. раздел 2.2.3). Далее строилась зависимость рассчитанных аномалий стока от изменений рассматриваемых климатических параметров в виде функции:

$$\Delta\overline{Y} = f(\Delta\overline{T}, \Delta\overline{P}), \qquad (3.1.1)$$

где $\Delta\overline{Y}$ – значение аномалии искомой нормы характеристики стока, $\Delta\overline{T}$ и $\Delta\overline{P}$ – осредненные по площади бассейна аномалии среднемноголетних (климатических) норм температуры и осадков соответственно. Функция (3.1.1) подбиралась методом наименьших квадратов по 30-ти рассчитанным величинам аномалий стока в зависимости от аномалий климатических параметров

Локальные оценки чувствительности рассчитанной характеристики речного стока к климатическим параметрам задаются градиентами функции (3.1.1) (аномалии нормы искомой характеристики стока) в направлении изменения параметра (аномалии нормы температуры воздуха или суммы осадков) (3.1.2)-(3.1.3) или сочетания параметров (3.1.4), а именно:

$$S_{\Delta T} = \left.\frac{\partial(\Delta\overline{Y})}{\partial(\Delta\overline{T})}\right|_{\Delta\overline{P}}, \tag{3.1.2}$$

$$S_{\Delta P} = \left.\frac{\partial(\Delta\overline{Y})}{\partial(\Delta\overline{P})}\right|_{\Delta\overline{T}}, \tag{3.1.3}$$

$$S_{\Delta P,\Delta T} = \left.\frac{\partial^2(\Delta\overline{Y})}{\partial(\Delta\overline{P})\partial(\Delta\overline{T})}\right|_{\overline{T},\overline{P}}, \tag{3.1.4}$$

Определяя производные (3.1.2)-(3.1.4), получаем оценки чувствительности $S_{\Delta T}$, $S_{\Delta P}$ для аномалий норм температуры воздуха и осадков, рассчитанных с использованием DC-метода, которые показывают на какую величину может измениться характеристика речного стока при изменении температуры воздуха и осадков соответственно.

Анализ чувствительности гидрологической системы бассейна р. Селенги к изменению климатических параметров выполнялся для аномалий среднемноголетних значений и показателей вариации годового и максимального стока. Результаты даны ниже в следующих разделах.

3.2 Оценка чувствительности среднего значения и показателей вариации годового стока к изменению климатических норм осадков и температуры воздуха

Для оценки чувствительности среднего значения и показателей вариации годового стока результаты расчетов по 30 искусственным сценариям, полученные DC-методом, сравнивались со среднемноголетним значением годового стока 1986-2013 гг. при исходных метеорологических данных. В таблицах 3.2.1-3.2.3 показаны результаты численных экспериментов, а именно аномалии среднего значения и показателей вариации годового стока р. Селенги (в %) при различных комбинациях климатических параметров (нормы температуры воздуха и осадков) по отношению к среднему и показателям вариации годового стока за период 1986-2013 гг.

Таблица 3.2.1 Аномалии (%) среднего значения годового стока р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-22.8	-27.7	-32.2	-36.4	-40.2	-47.3
-5	-11.8	-17.3	-22.4	-27.1	-31.5	-39.5
0	0.00	-6.2	-11.9	-17.2	-22.2	-31.2
5	12.5	5.7	-0.7	-6.7	-12.2	-22.3
10	25.8	18.2	11.1	4.5	-1.6	-12.8

Таблица 3.2.2 Аномалии (%) стандартного отклонения годового стока р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-19.9	-23.8	-27.5	-31.0	-34.4	-40.9
-5	-10.2	-14.4	-18.4	-22.4	-26.1	-33.2
0	0	-4.6	-9.0	-13.3	-17.3	-25.1
5	10.4	5.5	0.7	-3.8	-8.2	-16.7
10	21.1	15.9	10.8	6.0	1.2	-7.8

Таблица 3.2.3 Аномалии (%) коэффициента вариации годового стока р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	3.79	5.44	6.96	8.42	9.78	12.05
-5	1.80	3.53	5.10	6.55	7.97	10.40
0	0.00	1.66	3.31	4.78	6.24	8.82
5	-1.91	-0.20	1.49	3.11	4.56	7.17
10	-3.72	-1.97	-0.23	1.43	2.88	5.71

Анализ результатов численных экспериментов, приведенных в таблицах 3.2.1-3.2.3, показал, что зависимости аномалий среднего $\Delta\overline{Y}$, среднеквадратического отклонения $SD(\Delta\overline{Y})$ и

коэффициента вариации $C_v(\Delta\overline{Y})$ расчетных значений годового стока р. Селенги от изменений климатических параметров могут быть аппроксимированы линейными функциями:

$$\Delta\overline{Y} = -0.21 - 10.4\Delta\overline{T} + 2.1\Delta\overline{P}, \quad (3.2.1)$$

$$SD(\Delta\overline{Y}) = -0.10 - 8.3\Delta\overline{T} + 1.9\Delta\overline{P}, \quad (3.2.2)$$

$$C_v(\Delta\overline{Y}) = 0.23 + 2.95\Delta\overline{T} - 0.35\Delta\overline{P}. \quad (3.2.3)$$

Как показано на рисунках 3.2.1-3.2.3 подобранные методом наименьших квадратов линейные функции (3.2.1)-(3.2.3) хорошо описывают расчетные данные, приведенные в таблицах 3.2.1-3.2.3. Зависимости между значениями, рассчитанными с помощью модели и с помощью линейной функции, получились очень тесными (R^2=0.99).

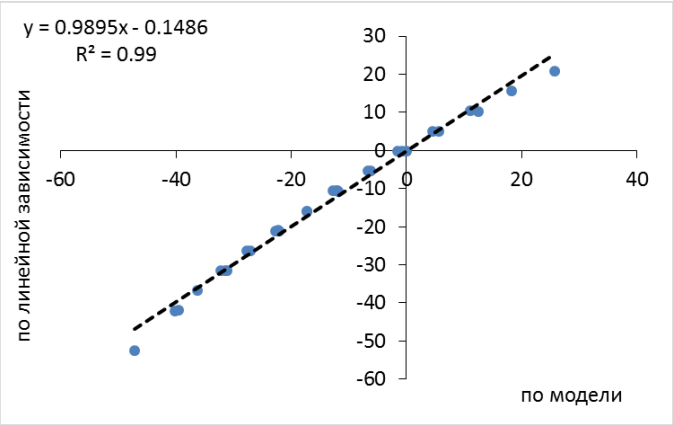

Рисунок 3.2.1. Зависимость между аномалиями (%) среднего годового стока р. Селенги, рассчитанными по линейной зависимости (3.2.1) и по модели формирования стока (Табл.3.2.1)

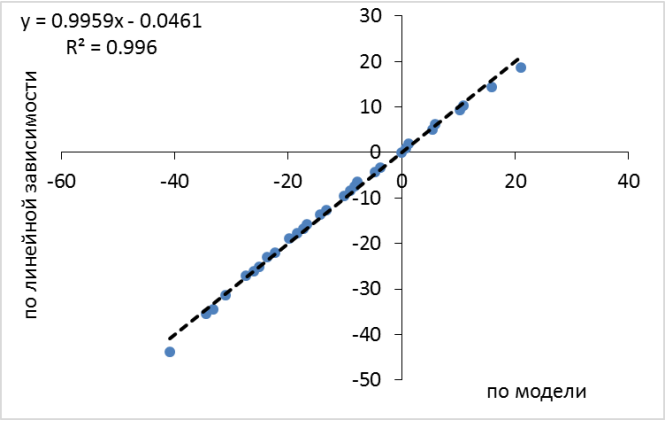

Рисунок 3.2.2 Зависимость между аномалиями (%) стандартного отклонения годового стока р. Селенги, рассчитанными по линейной зависимости (3.2.2) и по модели формирования стока (Табл.3.2.2)

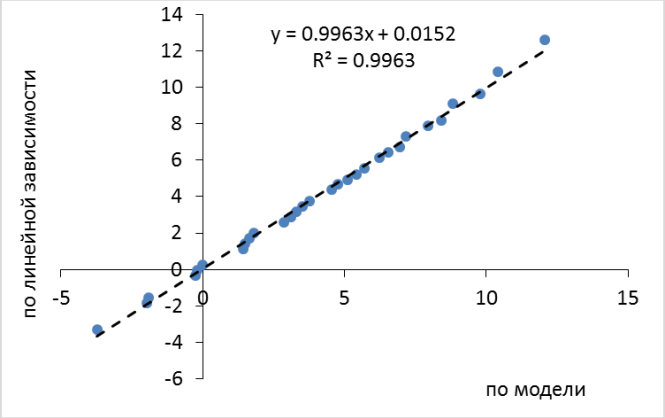

Рисунок 3.2.3 Зависимость между аномалиями (%) коэффициента вариации годового стока р. Селенги, рассчитанными по линейной зависимости (3.2.3) и по модели формирования стока (Табл.3.2.3)

Тем самым, полученные зависимости рассчитанных изменений аномалий среднего значения и показателей вариации годового стока р. Селенги от изменений климатических параметров можно считать, в первом приближении, линейными, поэтому полученные формулы (3.2.1-3.2.3) можно использовать для локальной оценки чувствительности.

Подставляя каждую подобранную зависимость (3.2.1)-(3.2.3) в (3.1.2)-(3.1.4), получаем следующие оценки чувствительности для среднего значений и показателей вариации годового стока, которые представлены в таблице 3.2.4.

Таблица 3.2.4 Оценки чувствительности среднего значения и показателей вариации годового стока к изменению климатических норм температуры воздуха и осадков

Показатель	$S_{\Delta T}$,%/°C^{-1}	$S_{\Delta P}$, %/(10%)	Стандартная погрешность линейной аппроксимации, %
$\Delta\overline{Y}$	-10.4	21	1.86
$SD(\Delta\overline{Y})$	-8.3	19	1.0
$C_v(\Delta\overline{Y})$	2.95	-3.5	0.23

Ковариационный эффект взаимодействия климатических параметров, описываемый оценкой $S_{\Delta T,\Delta P}$ для линейных функций (3.2.1)-(3.2.3), равен нулю.

Таким образом, анализ чувствительности годового стока р. Селенги к изменению климатических параметров показал, что увеличение средней по бассейну нормы температуры воздуха ΔT на 1°C (при неизменной норме осадков) приводит к уменьшению рассчитанного по модели среднемноголетнего годового стока р. Селенги на ~10%. Среднеквадратическое отклонение рассчитанного по модели годового стока при этом уменьшится на ~8%. Причина такого уменьшения - рост рассчитанного испарения с поверхности бассейна, вследствие роста дефицита влажности воздуха в соответствии с зависимостью, показанной на рисунке 3.1.1.

Увеличение средней по бассейну суммы осадков ΔP на 10% (при неизменной норме температуры воздуха) приводит к соответствующему увеличению рассчитанного по модели годового стока р. Селенги на 21%, 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%, т.е. возможный рост нормы осадков может увеличить и дисперсию годового стока.

Из формулы (3.2.3) следует, что изменения коэффициента вариации годового стока при изменениях норм осадков и температуры воздуха оказались разнонаправленными по отношению к изменениям среднего и среднеквадратического отклонения: при росте температуры воздуха коэффициент вариации годового стока увеличивается, а при росте осадков наоборот уменьшается. Полученный эффект объясняется тем, что чувствительность нормы годового стока сильнее чувствительности среднеквадратического отклонения годового стока к изменению норм климатических параметров. Например, рост нормы годового стока при росте осадков происходит быстрее, чем рост среднеквадратического отклонения годового стока, поэтому коэффициент вариации годового стока снижается с увеличением осадков. В целом, изменения коэффициента вариации годового стока р. Селенги при изменении годовых норм осадков и температуры воздуха оказались незначительными. Этот вывод может быть полезен для оценки возможных климатически обусловленных изменений кривых обеспеченности годового стока р. Селенги.

Аналогичные исследования были проведены для оценки чувствительности характеристик максимального стока р. Селенги к изменению климатических параметров. Результаты исследований описаны в следующем разделе.

3.3 Оценка чувствительности среднего значения и показателей вариации максимального стока к изменению климатических норм осадков и температуры воздуха

Для оценки чувствительности среднего и показателей вариации максимальных за год расходов воды результаты расчетов по 30 искусственным сценариям, полученных DC-методом, сравнивались со среднемноголетним значением максимального стока за 1986-2013 гг. при исходных метеорологических данных. В таблицах 3.3.1-3.3.3 приведены изменения среднего и показателей вариации максимального за год расхода при указанных сочетаниях изменений климатических параметров (нормы температуры воздуха и осадков).

Таблица 3.3.1 Аномалии (%) среднего значения максимального за год расхода стока р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-19.7	-23.9	-27.8	-31.2	-34.2	-39.4
-5	-10.1	-14.6	-19.0	-22.9	-26.3	-32.1
0	0.0	-4.9	-9.7	-14.1	-18.0	-24.4
5	10.4	5.3	0.1	-4.8	-9.2	-16.3
10	21.3	15.8	10.3	4.9	0.1	-7.9

Таблица 3.3.2 Аномалии (%) стандартного отклонения максимального за год расхода стока р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / Δ P,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-17.9	-20.2	-22.3	-24.2	-26.4	-31.3
-5	-9.2	-11.6	-13.9	-16.2	-18.5	-23.7
0	0.0	-2.8	-5.3	-7.6	-10.2	-16.0
5	9.6	6.4	3.6	1.1	-1.4	-7.8
10	19.6	16.0	13.0	10.2	7.5	0.6

Таблица 3.3.3 Аномалии (%) коэффициента вариации рассчитанного максимального за год расхода р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / Δ P,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	2.3	4.8	7.5	10.2	11.9	13.5
-5	1.0	3.5	6.2	8.7	10.6	12.3
0	0.0	2.2	4.9	7.5	9.5	11.1
5	-0.7	1.1	3.5	6.2	8.5	10.1
10	-1.4	0.2	2.5	5.1	7.4	9.3

Анализ результатов расчетов, приведенных в таблицах 3.3.1-3.3.3, показал, что зависимости аномалий среднего значения $\Delta Q_{\max}$, среднеквадратического отклонения $SD(\Delta Q_{\max})$,

коэффициента вариации $C_v(\Delta Q_{\max})$ максимального стока р. Селенги от изменений климатических параметров также могут быть аппроксимированы линейными функциями с высокой точностью:

$$\Delta Q_{\max} = -0.50 - 8.2\Delta\overline{T} + 1.8\Delta\overline{P}, \quad (3.3.1)$$

$$SD(\Delta Q_{\max}) = 0.39 - 5.3\Delta\overline{T} + 1.7\Delta\overline{P}, \quad (3.3.2)$$

$$C_v(\Delta Q_{\max}) = 0.84 + 3.85\Delta\overline{T} - 0.23\Delta\overline{P}. \quad (3.3.3)$$

Как показано на рисунках 3.3.1-3.3.3 подобранные методом наименьших квадратов линейные функции (3.3.1)-(3.3.3) хорошо описывают расчетные данные, приведенные в таблицах 3.3.1-3.3.3. Зависимости между значениями, рассчитанными с помощью модели и с помощью линейной функции, получились очень тесными (R^2 = 0.99).

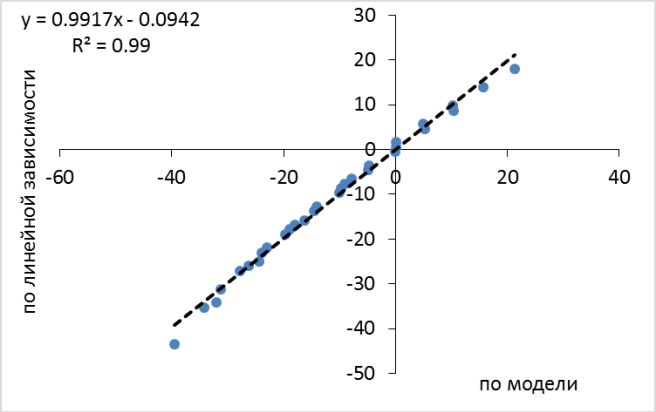

Рисунок 3.3.1. Зависимость между аномалиями (%) среднего максимального за год расхода р. Селенги, рассчитанными по линейной зависимости (3.3.1) и по модели формирования стока (Табл.3.3.1)

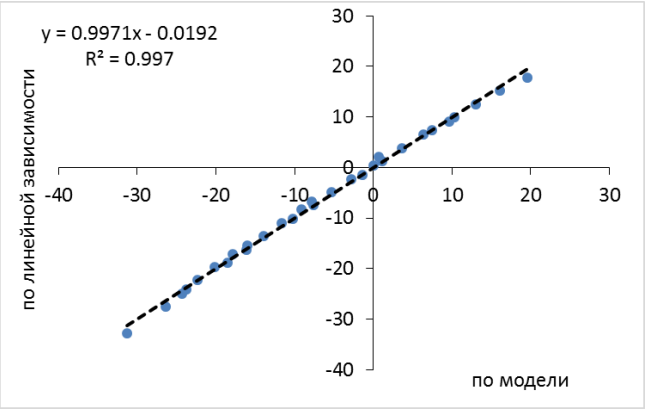

Рисунок 3.3.2 Зависимость между аномалиями (%) стандартного отклонения максимального за год расхода р. Селенги, рассчитанными по линейной зависимости (3.3.2) и по модели формирования стока (Табл.3.3.2)

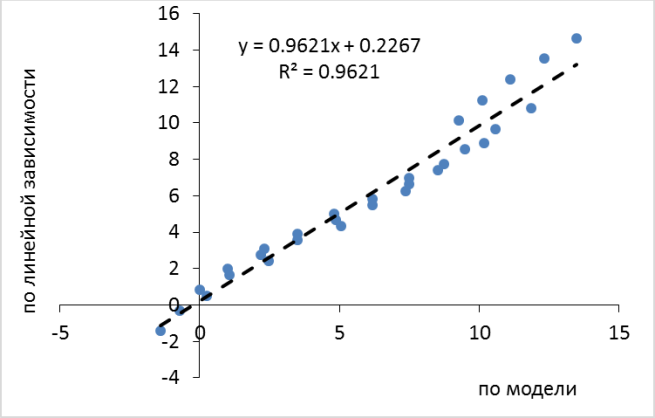

Рисунок 3.3.3. Зависимость между аномалиями (%) коэффициента вариации максимального за год расхода р. Селенги, рассчитанными по линейной зависимости (3.3.3) и по модели формирования стока (Табл.3.3.3)

Подставляя подобранные зависимости (3.3.1)-(3.3.3) в (3.1.2)-(3.1.4), получим оценки чувствительности для среднего значения $\Delta Q_{\max}$ и показателей вариации $SD(\Delta Q_{\max})$, $C_v(\Delta Q_{\max})$ максимального стока, представленные в таблице 3.3.4.

Таблица 3.3.4 Оценки чувствительности среднего и показателей вариации максимального за год расхода к изменению климатических норм температуры воздуха и осадков

Показатель	$S_{\Delta T}$,%/°C^{-1}	$S_{\Delta P}$, %/(10%)	Стандартная погрешность линейной аппроксимации, %
$\Delta Q_{\max}$	-8.2	18	1.4
$SD(\Delta Q_{\max})$	-5.3	17	0.72
$C_v(\Delta Q_{\max})$	3.9	-2.3	0.82

Ковариационный эффект взаимодействия климатических параметров, описываемый оценкой $S_{\Delta T,\Delta P}$, для линейных функций (3.3.1)-(3.3.3) равен нулю.

Таким образом, анализ чувствительности стока р. Селенги к изменению климатических параметров показал, что увеличение средней по бассейну нормы температуры воздуха ΔT на 1°C (при неизменной норме осадков) приводит к уменьшению рассчитанного по модели среднемноголетнего максимального стока р. Селенги на 8%. Среднеквадратическое отклонение рассчитанного по модели максимального стока при этом уменьшится на 5%. Увеличение средней по бассейну климатической суммы осадков ΔP на 10% (при неизменной норме температуры воздуха) приводит к соответствующему изменению рассчитанной по модели среднемноголетнего максимального стока р. Селенги на 18%, т.е. изменения стока превышают изменения осадков почти в 2 раза. Среднеквадратическое отклонение рассчитанного по модели годового стока при этом увеличится на 17%. Таким образом, сравнивая результаты, следует отметить, что

чувствительность характеристик среднемноголетнего максимального стока меньше, чем чувствительность характеристик годового стока.

В качестве характеристик максимального стока также использовались интегральные показатели, а именно среднегодовой объем стока выше пороговых значений, соответствующих наблюденным расходам воды 10%, 25% и 30%-й вероятностей превышения (в дальнейшем обозначаемые, как $V(Q_{10\%})$, $V(Q_{25\%})$, $V(Q_{30\%})$, соответственно), которые определялись по кривым повторяемости ежедневных расходов воды. В таблице 3.3.5 показана статистика рассчитанных характеристик максимального стока в сравнении с соответствующими статистиками фактических величин за период 1986-2013 гг. Видно, что в целом модель позволила с удовлетворительной точностью воспроизвести статистики искомых характеристик максимального стока р. Селенги за рассматриваемый период.

Таблица 3.3.5. Статистика рассчитанных характеристик максимального стока р. Селенги в сравнении с соответствующими статистиками фактических характеристик за период 1986-2013 гг.

Вероятность превышения порогового расхода, %	Фактический расход воды в створе с. Кабанск, м^3/с	Средний объем максимального стока (км^3)		Среднеквадратическое отклонение максимального стока (км^3)		Коэффициент вариации максимального стока	
		Факт	Расчет	Факт	Расчет	Факт	Расчет
10	1930	10.1	9.5	9.9	8.6	0.98	0.91
25	1250	15.5	13.2	10.6	10.0	0.69	0.76
30	1120	17.4	14.7	10.4	10.1	0.60	0.69

По схеме, описанной в предыдущем разделе, нами были рассчитаны изменения интегральных характеристик максимального стока при изменении климатических параметров (% по отношению к рассчитанным значениям за период 1986-2013 годов). Результаты представлены в таблицах 3.3.6-3.3.14.

Таблица 3.3.6 Аномалии (%) среднего объема стока $V(Q_{10\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-29.3	-10.4	-22.5	-35.8	-39.2	-52.7
-5	-15.6	-19.3	-25.4	-5.2	-16.1	-41.8
0	0.0	-4.4	-14.4	-18.2	-20.0	-12.7
5	27.7	10.6	4.5	1.7	-7.0	-22.7
10	61.8	37.5	28.4	8.2	-0.1	-10.0

Таблица 3.3.7 Аномалии (%) стандартного отклонения объема стока $V(Q_{10\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-18.3	-24.2	-32.5	-40.3	-46.2	-51.6
-5	-12.2	-16.0	-16.5	-22.9	-28.6	-43.1
0	0	-4.8	-9.4	-13.8	-16.9	-26.5
5	11.4	5.2	1.7	-4.1	-9.1	-18.0
10	27.2	20.0	10.4	7.3	2.6	-9.6

Таблица 3.3.8 Аномалии (%) коэффициента вариации рассчитанного максимального за год стока $V(Q_{10\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	15.6	-15.4	-12.8	-6.9	-11.4	2.2
-5	4.0	4.2	12.0	-18.7	-14.9	-2.2
0	0.0	-0.4	5.8	5.4	4.0	-15.8
5	-13.2	-4.4	-2.7	-5.7	-2.2	6.1
10	-20.9	-13.2	-14.3	-1.1	2.6	0.5

Таблица 3.3.9 Аномалии (%) среднего объема стока $V(Q_{25\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-31.9	-40.0	-47.3	-47.8	-50.8	-60.4
-5	-16.1	-20.6	-31.9	-36.0	-43.6	-48.8
0	0.0	-6.0	-16.7	-24.2	-28.3	-41.0
5	25.5	11.1	-2.0	-10.7	-17.7	-31.2
10	55.8	38.2	21.7	8.5	-3.3	-18.5

Таблица 3.3.10 Аномалии (%) стандартного отклонения объема стока $V(Q_{25\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-29.4	-34.2	-37.5	-40.9	-45.0	-52.2
-5	-14.7	-22.6	-27.6	-33.1	-35.4	-43.7
0	0.0	-8.6	-14.3	-21.3	-27.3	-34.5
5	13.2	5.4	-1.5	-7.8	-14.4	-25.3
10	24.4	17.1	11.2	3.8	-1.9	-14.0

Таблица 3.3.11 Аномалии (%) коэффициента вариации рассчитанного максимального за год стока $V(Q_{25\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	3.5	9.7	18.6	13.3	11.9	20.8
-5	1.7	-2.5	6.3	4.4	14.4	10.1
0	0.0	-2.8	2.9	3.8	1.3	11.0
5	-9.8	-5.1	0.6	3.3	3.9	8.6
10	-20.1	-15.3	-8.6	-4.3	1.5	5.5

Таблица 3.3.12 Аномалии (%) среднего объема стока $V(Q_{30\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-31.8	-40.9	-47.2	-50.7	-53.9	-60.1
-5	-18.4	-25.6	-34.2	-40.2	-43.5	-51.2
0	0	-11.1	-21.9	-25.8	-34.1	-45.4
5	25.3	11.5	-1.8	-12.2	-22.1	-34.2
10	51.9	36.2	22.1	8.5	-3.0	-23.3

Таблица 3.3.13 Аномалии (%) стандартного отклонения объема стока $V(Q_{30\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	-26.9	-32.4	-37.4	-41.6	-43.8	-51.9
-5	-12.8	-19.7	-25.6	-31.6	-36.6	-43.6
0	0.0	-7.0	-12.4	-19.9	-24.9	-34.6
5	11.10	4.7	-0.9	-7.5	-12.5	-24.2
10	22.5	16.2	9.8	4.6	-1.2	-13.0

Таблица 3.3.14 Аномалии (%) коэффициента вариации рассчитанного максимального за год стока $V(Q_{30\%})$ р. Селенги при заданных изменениях климатических норм

ΔT,ºC / ΔP,%	0	0.5	1	1.5	2	3
-10	7.2	14.3	18.6	18.5	21.9	20.4
-5	6.8	7.8	13.0	14.5	12.1	15.6
0	0.0	4.6	12.1	8.0	14.0	19.8
5	-11.4	-6.1	0.8	5.3	12.3	15.2
10	-19.3	-14.7	-10.1	-3.6	1.8	13.5

Анализ результатов расчетов, приведенных в таблицах 3.3.6-3.3.14, показал, что зависимости среднегодовых $V(Q_{10\%}), V(Q_{25\%}), V(Q_{30\%})$, среднеквадратических отклонений $SD[V(Q_{10\%})]$, $SD[V(Q_{25\%})], SD[V(Q_{30\%})]$ коэффициентов вариации $C_v[V(Q_{10\%})]$, $C_v[V(Q_{25\%})]$,

$C_v[V(Q_{30\%})]$ расчетных значений интегральных характеристик максимального стока р. Селенги от изменений климатических параметров могут быть аппроксимированы линейными функциями с высокой точностью:

$$V(Q_{10\%}) = 8.3 - 12.3\Delta\overline{T} + 2.6\Delta\overline{P}, \quad (3.3.4)$$

$$SD[V(Q_{10\%})] = 1.3 - 10.4\Delta\overline{T} + 2.2\Delta\overline{P}, \quad (3.3.5)$$

$$C_v[V(Q_{10\%})] = -4.4 + 0.45\Delta\overline{T} - 0.14\Delta\overline{P}, \quad (3.3.6)$$

$$V(Q_{25\%}) = 3.5 - 15.5\Delta\overline{T} + 3.1\Delta\overline{P}, \quad (3.3.7)$$

$$SD[V(Q_{25\%})] = -2.7 - 10.8\Delta\overline{T} + 2.3\Delta\overline{P}, \quad (3.3.8)$$

$$C_v[V(Q_{25\%})] = -4.3 + 5.4\Delta\overline{T} - 0.9\Delta\overline{P}, \quad (3.3.9)$$

$$V(Q_{30\%}) = 2.0 - 15.9\Delta\overline{T} + 3.1\Delta\overline{P}, \quad (3.3.10)$$

$$SD[V(Q_{30\%})] = -2.2 - 10.7\Delta\overline{T} + 2.3\Delta\overline{P}, \quad (3.3.11)$$

$$C_v[V(Q_{30\%})] = -1.8 + 6.7\Delta\overline{T} - 1.1\Delta\overline{P}. \quad (3.3.12)$$

Однако, как показано на рисунках 3.3.4-3.3.6 не все функции, подобранные методом наименьших квадратов, получились линейными. Так, зависимость (3.3.6) между значениями, рассчитанными с помощью модели и с помощью линейной функции, оказалась существенно нелинейной. Зависимости между остальными значениями, рассчитанными с помощью модели и с помощью линейной функции, удовлетворительно описывают расчетные данные, однако у большинства зависимостей теснота связей получилась хуже (R^2 = 0.83-0.94), чем для среднего и показателей вариации годового стока и максимального за год расхода (см. разделы 3.2, 3.3). Стоит отметить, что зависимости стандартных отклонений $SD[V(Q_{10\%})]$, $SD[V(Q_{25\%})], SD[V(Q_{30\%})]$ (3.3.5), (3.3.8), (3.3.11) при этом получились очень тесными (R^2 = 0.99). Среднеквадратические погрешности расчетов изменений интегральных характеристик максимального стока представлены в таблице 3.3.15.

Как показано на рисунках 3.3.4-3.3.6 линейные функции (кроме 3.3.6) хорошо описывают расчетные данные, приведенные в таблицах 3.3.6-3.3.14.

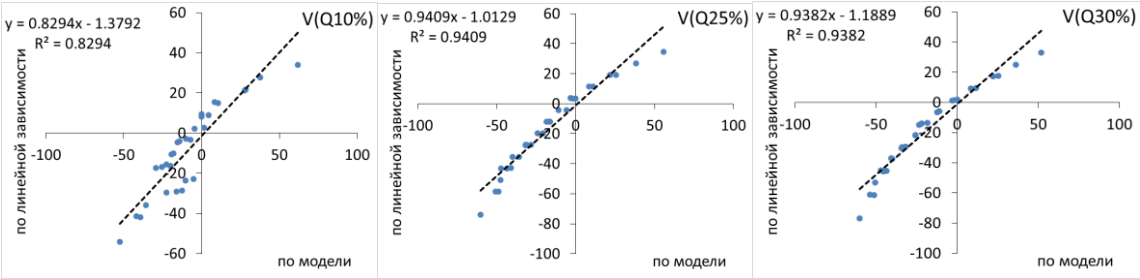

Рисунок 3.3.4. Зависимость между аномалиями (%) среднего максимального стока $V(Q_{10\%}), V(Q_{25\%}), V(Q_{30\%})$ р. Селенги, рассчитанными по линейным зависимостям (3.3.4), (3.3.7), (3.3.10) и по модели формирования стока (Табл.3.3.6, 3.3.9, 3.3.12)

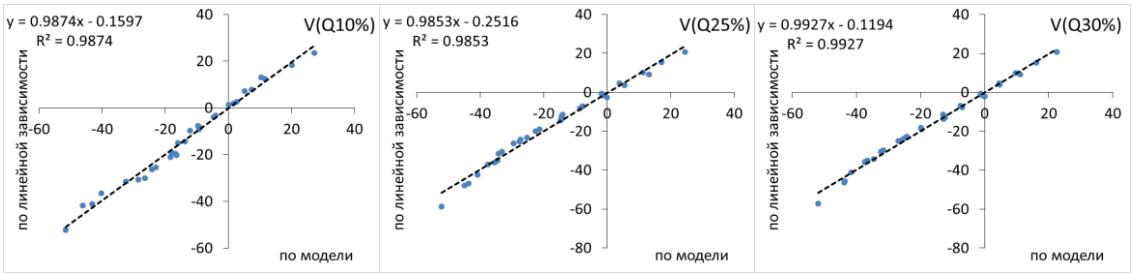

Рисунок 3.3.5. Зависимость между аномалиями (%) стандартного отклонения максимального стока $V(Q_{10\%}), V(Q_{25\%}), V(Q_{30\%})$ р. Селенги, рассчитанными по линейным зависимостям (3.3.5), (3.3.8), (3.3.11) и по модели формирования стока (Табл.3.3.7, 3.3.10, 3.3.13)

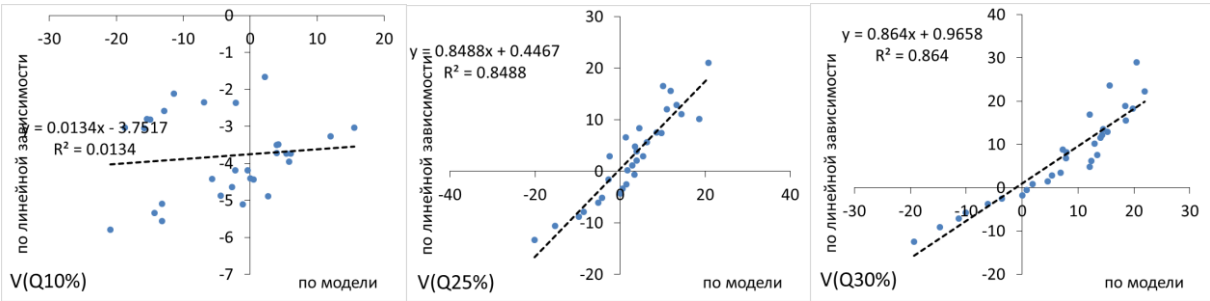

Рисунок 3.3.6. Зависимость между аномалиями (%) коэффициента вариации максимального стока $V(Q_{10\%}), V(Q_{25\%}), V(Q_{30\%})$ р. Селенги, рассчитанными по линейным зависимостям (3.3.6), (3.3.9), (3.3.12) и по модели формирования стока (Табл.3.3.8, 3.3.11, 3.3.14)

Подставляя подобранные зависимости в (3.1.2)-(3.1.4), получим следующие локальные оценки чувствительности для среднемноголетних интегральных характеристик максимального стока $V(Q)$, $SD[V(Q)]$ и $C_v[V(Q)]$, соответствующие наблюденным расходам воды 10%, 25% и 30% вероятности превышения (Табл. 3.3.15).

Таблица 3.3.15 Оценки чувствительности средних значений и показателей вариации объема максимального стока к изменению климатических норм температуры воздуха и осадков.

Вероятность превышения порогового расхода	Характеристика максимального расхода	$S_{\Delta T}$,%/°с$^{-1}$	$S_{\Delta P}$, %/(10%)	Стандартная погрешность линейной аппроксимации, %
10%	$V(Q)$	-12.3	26	9.9
	$SD[V(Q)]$	-10.4	22	2.1
	$C_V[V(Q)]$	-	-	-
25%	$V(Q)$	-15.5	31	6.7
	$SD[V(Q)]$	-10.8	23	2.42
	$C_V[V(Q)]$	5.4	-9	3.5
30%	$V(Q)$	-15.9	31	6.9
	$SD[V(Q)]$	-10.7	23	1.6
	$C_V[V(Q)]$	6.7	-11	3.98

Ковариационный эффект взаимодействия климатических параметров, описываемый оценкой $S_{\Delta T,\Delta P}$, для полученных линейных функций равен нулю.

Объемы максимального стока р. Селенги оказались более чувствительны к изменениям климатических параметров, чем соответствующие характеристики среднемноголетнего годового стока и максимального за год расхода (см. разделы 3.2, 3.3). При неизменяющейся норме осадков и росте температуры воздуха ΔT на 1°С рассчитанные по модели нормы максимального стока р. Селенги уменьшаются на 12-16% в зависимости от вероятности превышения порогового расхода. Среднеквадратические отклонения рассчитанного по модели нормы максимального стока в зависимости от вероятности превышения порогового расхода при этом уменьшаются на 10-11%. Увеличение средней по бассейну климатической суммы осадков ΔP на 10% (при неизменной норме температуры воздуха) приводит к соответствующему увеличению норм рассчитанных по модели среднемноголетнего максимального стока р. Селенги на 26-31% в зависимости от вероятности превышения порогового расхода, т.е. изменения стока превышают изменения осадков более чем в 2,5 раза. Среднеквадратические отклонения рассчитанных по модели норм максимального стока в зависимости от вероятности превышения порогового расхода при этом увеличиваются на 22-23%. Для всех характеристик максимального стока, как и для годового, увеличение нормы температуры воздуха приводит к уменьшению нормы стока вследствие увеличения испарения, а рост нормы осадков – к росту нормы стока.

Параметры вариации среднемноголетнего максимального стока р. Селенги оказались менее чувствительны к изменениям климатических норм, чем соответствующие показатели вариации годового стока, в отличие от интегральных характеристик максимального стока. Чувствительность интегральных характеристик максимального стока к изменению

климатических параметров растет с увеличением порогового расхода. Теснота связей между значениями, рассчитанными с помощью модели и с помощью линейных функций, увеличивается с увеличением вероятности превышения порогового расхода.

Из формул (3.3.3), (3.3.9), (3.3.12) следует, что изменения коэффициентов вариации для всех характеристик максимального стока при изменениях норм осадков и температуры воздуха также, как и для годового стока, оказались разнонаправленными по отношению к изменениям среднемноголетнего и среднеквадратического отклонения: при росте температуры воздуха коэффициенты вариации максимального стока увеличиваются, а при росте осадков наоборот уменьшаются. Полученный эффект также можно объяснить тем, что чувствительность нормы максимального стока сильнее чувствительности среднеквадратического отклонения к изменению климатических норм. Например, рост нормы максимального стока при росте осадков происходит быстрее, чем рост среднеквадратического отклонения, поэтому коэффициент вариации максимального стока снижается с увеличением осадков. Таким образом, возможный рост норм температуры и осадков может увеличить не только норму годового и максимального стока, но и их дисперсию.

Полученные результаты могут свидетельствовать о нелинейности отклика гидрологической системы бассейна р. Селенги на возможные изменения климата. Обнаруженный эффект, в частности, может привести к увеличению частоты экстремальных гидрологических явлений при росте нормы осадков в бассейне р. Селенги.

3.4 Анализ изменений внутригодового распределения стока вследствие изменения климатических параметров

Для анализа изменений внутригодового распределения стока вследствие изменения климатических параметров были построены среднемноголетние (типовые) гидрографы по заданным искусственным сценариям изменения нормы осадков и температуры воздуха, которые сравнивались со среднемноголетним расчетным гидрографом за 1986-2013 гг. при исходных метеорологических данных (Рис.3.4.1).

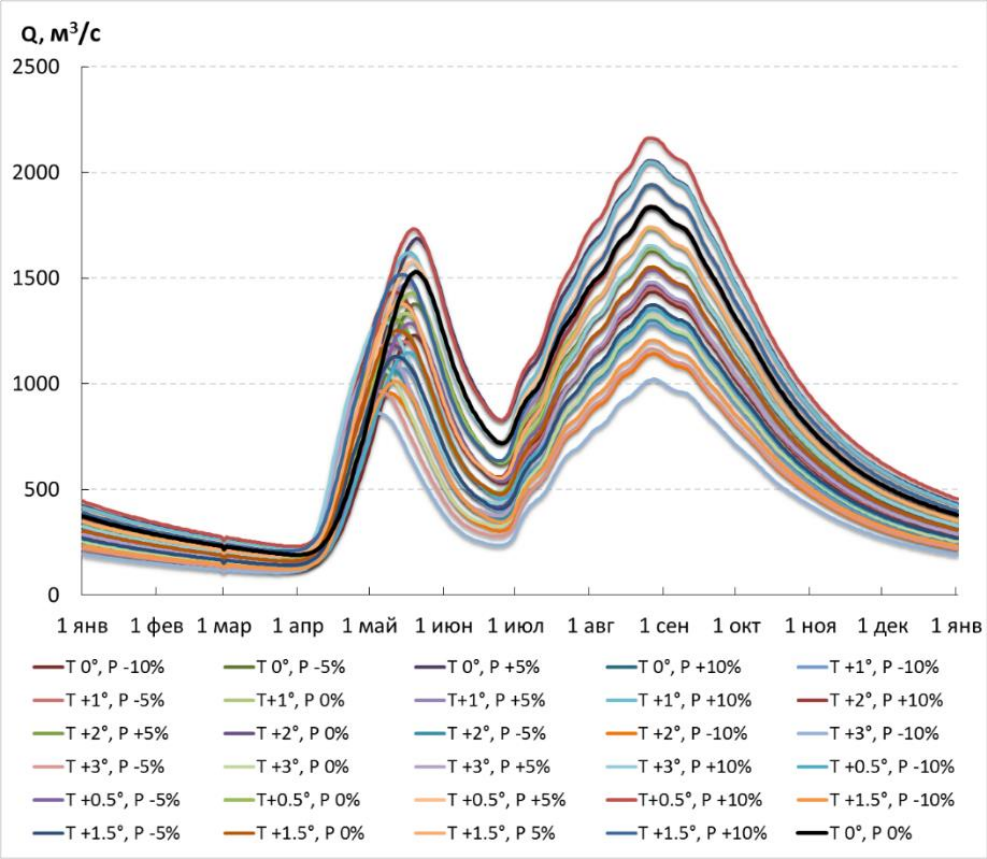

Рисунок 3.4.1 Чувствительность рассчитанных среднемноголетних гидрографов р. Селенги в створе с. Кабанск к возможным изменениям средних по бассейну климатических норм осадков и температуры воздуха.

Осредненный гидрограф за 1986-2013 гг. имеет два пика, но с более высокими максимальными расходами для летних паводков, чем для половодья (Рис.3.4.1).

Дополнительно на рисунке 3.4.2 показаны изменения типового гидрографа, рассчитанного при заданных изменениях нормы осадков (температура воздуха не изменялась), а на рисунке 3.4.3 – наоборот, при заданных изменениях температуры воздуха и неизмененных осадках.

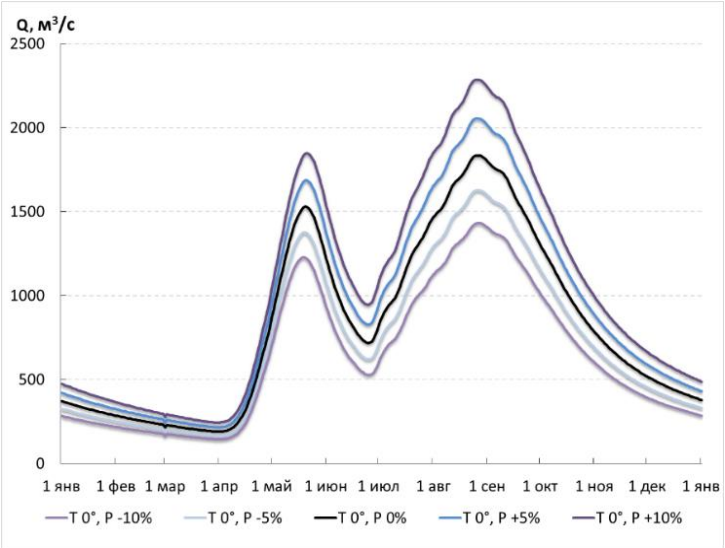

Рисунок 3.4.2 Среднемноголетние гидрографы р. Селенги в створе с. Кабанск, рассчитанные при изменении среднегодовых осадков и неизменной средней температуре воздуха

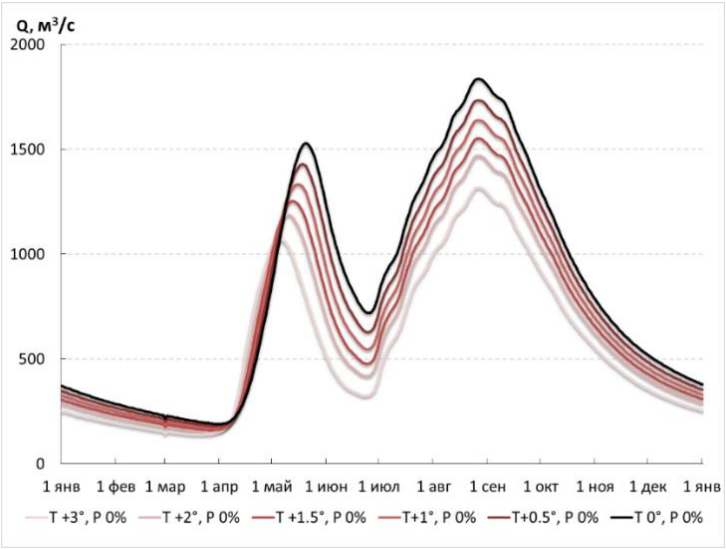

Рисунок 3.4.3 Среднемноголетние гидрографы р. Селенги в створе с. Кабанск, рассчитанные при изменении среднегодовой температуры воздуха и неизменных осадках.

Видно, 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 смещаются на несколько дней раньше (примерно на 16 дней). Потепление также способствует значительному снижению пиковых расходов воды дождевых паводков, т.к. с ростом температуры увеличивается и испарение. Также отмечается замедление интенсивности снижения расхода при увеличении температуры воздуха. Так, если уменьшение максимального расхода в половодье при росте температуры воздуха на +0.5°С составило порядка 100 м^3/с, то при росте температуры на те же +0.5°С, но от +1.5 до +2°С - меньше 70 м^3/с. В паводковый период для бассейна Селенги наблюдается аналогичный эффект, но уменьшение максимального стока при тех же значениях роста температуры составило 120 м^3/с и 100 м^3/ соответственно.

Глава 4. Предвычисление возможных многолетних изменений стока р. Селенги в XXI веке на основе численных экспериментов с гидрологической и глобальными климатическими моделями

В данной главе описаны результаты исследований, направленных на предвычисление возможных гидрологических последствий изменения климата в бассейне р. Селенги в XXI веке. Исследования проводились на базе выполненных нами численных экспериментов с разработанной моделью формирования стока р. Селенги и ансамблем расчетных данных глобальных моделей климата.

Глава построена следующим образом. В первом разделе показаны возможности расчета многолетних характеристик стока Селенги за исторический период на основе разработанной гидрологической модели, на входе которой задаются метеорологические данные, рассчитанные с помощью ансамбля GCMs. Затем следует раздел, в котором описаны возможные изменения климата бассейна р. Селенги в XXI веке по данным GCMs, а также результаты предвычисления характеристик водного режима бассейна по указанным данным. В третьем разделе дан анализ неопределенности расчетных оценок возможных изменений стока р. Селенги в XXI веке. В последнем, четвертом разделе, даны результаты по анализу чувствительности среднего годового стока р. Селенги к изменению климатических параметров по данным глобальных моделей климата, и показаны возможности использования этих результатов для снижения неопределенности расчетных оценок возможных изменений стока р. Селенги в XXI веке.

4.1 Моделирование стока р. Селенги за исторический период при использовании данных расчетов по глобальным моделям климата

Для численных экспериментов мы использовали данные GCMs, - участников проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) [Taylor et al., 2012]. Проект CMIP5 был создан для реализации Всемирной программы по исследованию климата, которая проводится МГЭИК [IPCC, 2013]. Данные GCMs включают расчеты климата XX века в соответствии с наблюденными концентрациями парниковых газов и аэрозолей, а также сценарные расчеты климата XXI века при разных сценариях изменений внешних радиационных воздействий последнего поколения RCP [IPCC, 2013]. Как уже отмечалось в Главе 1, на предыдущих стадиях проекта CMIP использовались сценарии, основанные на содержании эмиссий парниковых газов и социально-экономических показателях SRES.

Данные расчетов GCMs были предоставлены нам организаторами международного проекта ISI-MIP2 (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project Phase 2), инициированного Потсдамским Институтом изучения климата (Германия), по моделированию влияния изменений климата на природные системы (ИВП РАН – участник проекта). Исходные расчетные данные GCMs были интерполированы на сетку 0.5° × 0.5° и скорректированы на континентальном

масштабе путем устранения систематических погрешностей расчета в сравнении с данными метеорологического реанализа WATCH [Weedon et al., 2011] (процедура коррекции описана в [Hempel et al., 2013]).

Для проведения численных экспериментов нами были отобраны четыре глобальные климатические модели: GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM. При отборе мы руководствовались следующими критериями: различием между моделями по пространственному разрешению, структуре сеток, набору учитываемых физических процессов, наличием расчетных данных по каждому из четырех RCP-сценариев.

В таблице 4.1.1 дана краткая исходная информация по каждой модели.

Таблица 4.1.1 Краткое описание исходной информации о глобальных климатических моделях, данные которых используются в исследовании

Индекс модели	Научные организации-разработчики, страна	Год создания	Разрешение атмосферного блока модели	Разрешение океанического блока модели	Источник информации
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, UK	2009	(1.875º×1.25º) L38	(0.3-1 º×1.0º) L40	Jones et al., 2011
IPSL-CM5A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace, France	2010	(1.9º×3.75º) L39	(2º×2º) L31	Dufresne et al., 2013
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan	2010	(2.8º×2.8º) L80	(1.4º×0.5º) L44	Watanabe et al., 2011
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2010	(2º ×2.5º) L24	(1º×0.3-1.0º) L50	Dunne et al., 2012

Нами были созданы базы метеорологических данных расчетов по глобальным моделям климата для бассейна р. Селенги. Рассчитанные по этим данным ряды среднесуточных значений температуры воздуха, осадков и дефицита влажности воздуха задавались в качестве граничных условий в откалиброванную гидрологическую модель бассейна р. Селенги.

Ансамбль данных за исторический период по большинству глобальных моделей климата содержит данные до 2005 г. (включительно). Поэтому в качестве базового был принят период 1986-2005 гг.

Достоверность расчетов будущего климата определяется способностью моделей воспроизводить современное его состояние в соответствии с имеющимися данными наблюдений или реанализа. Поэтому первой задачей стояла оценка способности воспроизведения выбранными GCMs климатических характеристик на водосборе р. Селенги (на региональном масштабе) в соответствии с данными реанализа EWEMBI за 1986-2005 гг.

Проведенный нами анализ расчетных данных показал, что отобранные GCMs со значительными погрешностями описывают климатические нормы температуры и влажности воздуха, количества осадков, осредненные по бассейну р. Селенги за исторический период. По данным, представленным в таблице 4.1.2, можно отметить, что модели в разной степени занижают нормы температуры и дефицита влажности воздуха, завышая при этом количество осадков.

Таблица 4.1.2 Среднегодовые за период 1986-2005 гг. средние по бассейну Селенги метеорологические характеристики.

Источник информации	Температура воздуха, °С	Осадки, мм	Дефицит влажности воздуха, мб
HadGEM2-ES	-2.64	378	2.28
IPSL-CM5A-LR	-2.28	385	2.06
MIROC-ESM-CHEM	-2.71	377	1.91
GFDL-ESM2M	-2.54	363	2.67
Среднее по ансамблю	-2.54	376	2.23
Реанализ EWEMBI	-2.14	361	2.97

Анализ среднегодовых значений температуры и влажности воздуха за период 1986 по 2005 гг. по данным реанализа EWEMBI показал положительные тренды (Рис.4.1.1, 4.1.2). Для этого же двадцатилетнего периода анализ среднегодовых значений сумм осадков показал отрицательный тренд (Рис.4.1.3). Сопоставляя тренды последовательностей среднегодовых значений указанных климатических характеристик по данным реанализа и по расчетным данным GCMs, мы видим, что среднее из ансамбля GCMs за этот же период не воспроизводит тренды среднегодового дефицита влажности и среднегодовой суммы осадков в бассейне р. Селенги (Рис. 4.1.2-4.1.3).

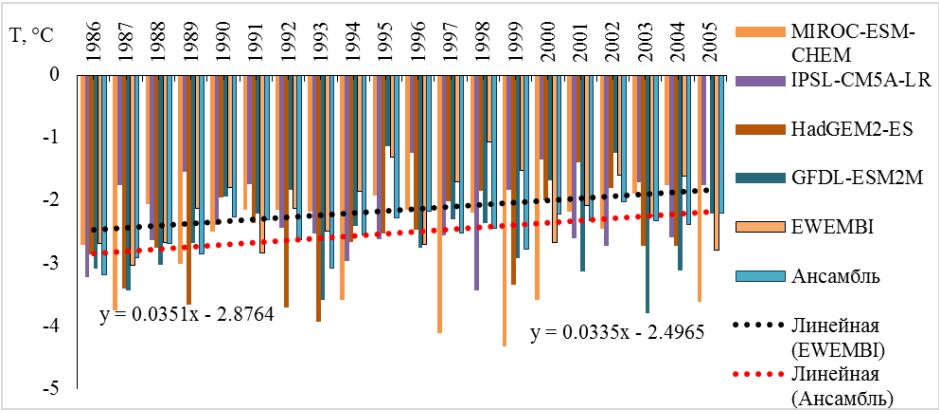

Рисунок 4.1.1 Среднегодовая температура воздуха в бассейне р. Селенги за период 1986-2005 гг.

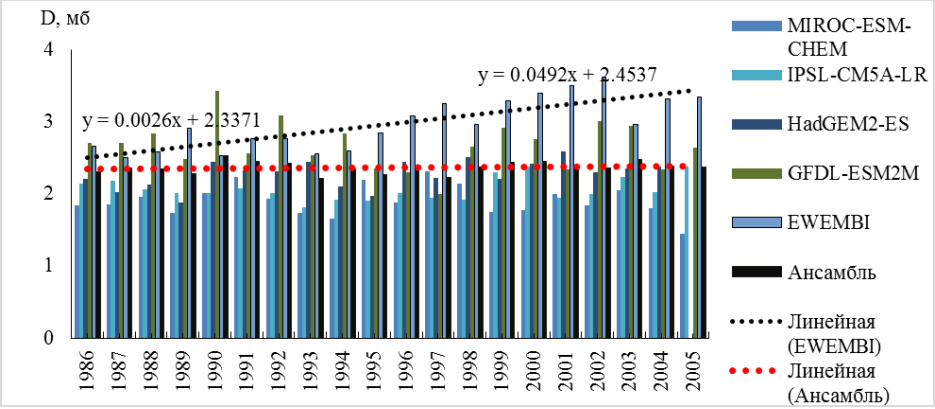

Рисунок 4.1.2 Среднегодовой дефицит влажности воздуха в бассейне р. Селенги за период 1986-2005 гг.

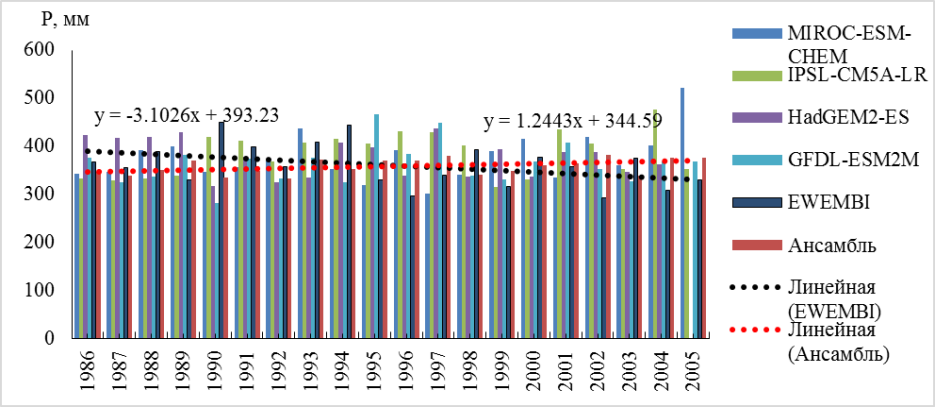

Рисунок 4.1.3 Среднегодовая сумма осадков в бассейне р. Селенги за период 1986-2005 гг.

Указанные погрешности в данных регионального климата, рассчитанных с помощью GCMs, не могут не привести к значительным ошибкам в расчете стока р. Селенги с использованием этих данных. Это утверждение иллюстрируется рисунком 4.1.4. За период 1986-2005 гг. расчет по гидрологической модели при задании входных данных по ансамблю GCMs показал значительное увеличение годового стока, несмотря на начавшееся с 1996 года экстраординарное маловодье (Рис.4.1.4).

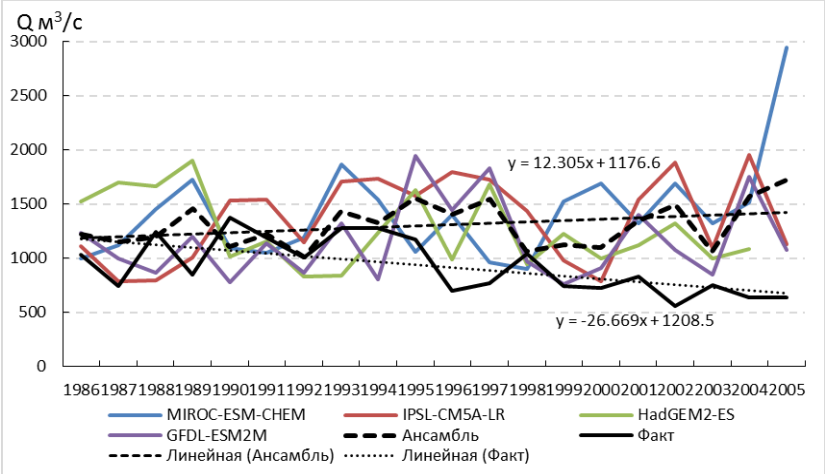

Рисунок 4.1.4 Вариации рассчитанного годового стока р. Селенги по фактическим данным и данных глобальных моделей климата за период 1986-2005 гг.

Таким образом, несмотря на то, что данные GCMs корректировались, как уже было отмечено, в масштабе континентов по данным метеорологического реанализа WATCH, оказалось, что для использования расчетных данных по этим моделям на региональном масштабе этого недостаточно, поэтому было принято решение о применении дополнительной коррекции с помощью процедуры (т.н. «bias-correction»), предложенной в работе [Gelfan et al., 2015б].

Коррекция проводилась для рядов среднесуточных значений осадков, температуры и влажности воздуха, рассчитанных по 4 глобальным моделям климата с учетом разницы между среднемноголетними, осредненными по площади водосбора, значениями метеовеличин, определенными по данным реанализа EWEMBI за периоды 1986-1995 и 1996-2005 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 среднемноголетних, осредненных по площади бассейна Селенги, рассчитанных значений по данным GCMs к средней температуре воздуха, сумме осадков за год и среднему дефициту влажности воздуха, полученных по данным реанализа. Заметим, что нами использован «мягкий» вариант коррекции, когда корректируются только средние годовые значения соответствующих метеорологических величин.

Качество воспроизведения глобальными моделями среднего сезонного хода температуры и дефицита влажности воздуха, а также количества осадков на водосборе р. Селенги до и после региональной «bias-correction» для периодов 1986-1995 и 1996-2005 гг. можно оценить по рисункам (Рис.4.1.5-4.1.10).

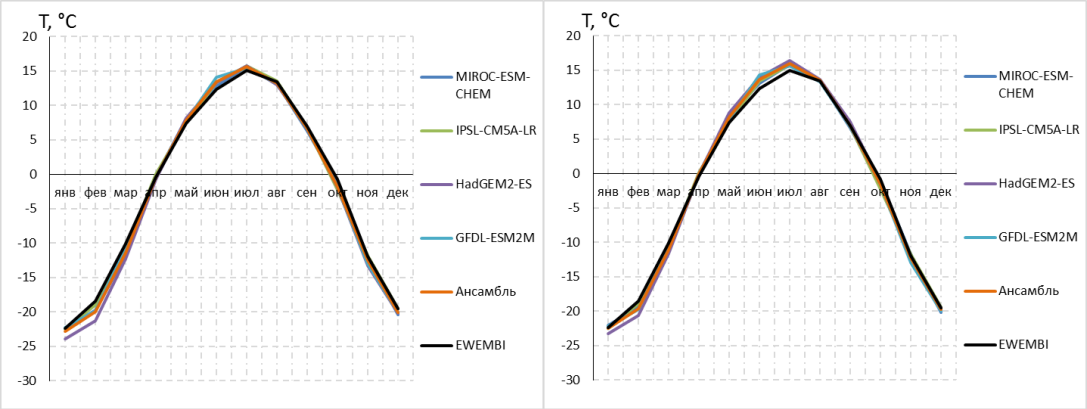

Рисунок 4.1.5 Сезонный ход температуры воздуха в бассейне р. Селенги по данным реанализа EWEMBI и глобальных моделей климата за период 1986-1995 гг. (слева – без коррекции, справа – с коррекцией данных глобальных моделей)

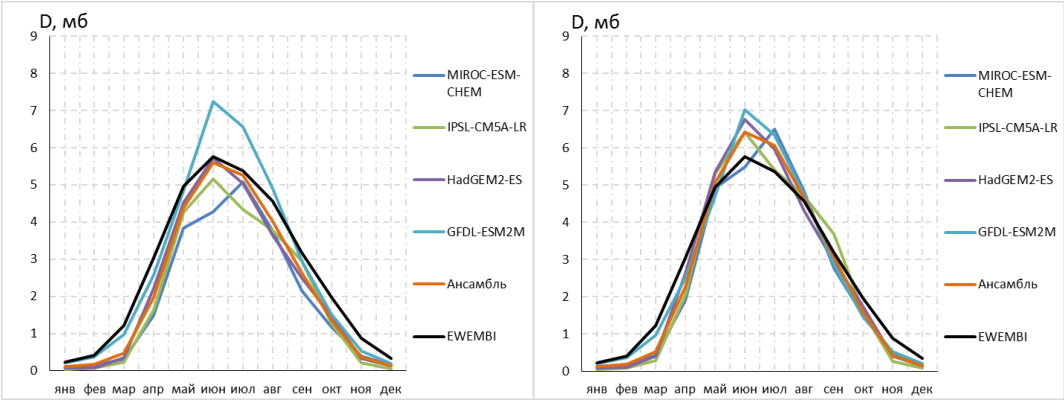

Рисунок 4.1.6 Сезонный ход дефицита влажности в бассейне р. Селенги по данным реанализа EWEMBI и глобальных моделей климата за период 1986-1995 гг. (слева – без коррекции, справа – с коррекцией данных глобальных моделей)

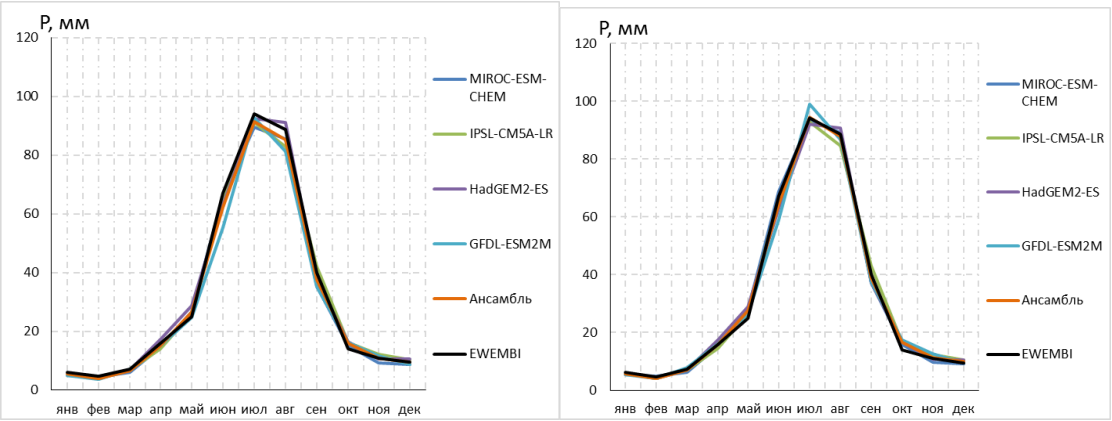

Рисунок 4.1.7 Сезонный ход количества осадков в бассейне р. Селенги по данным реанализа EWEMBI и глобальных моделей климата за период 1986-1995 гг. (слева – без коррекции, справа – с коррекцией данных глобальных моделей)

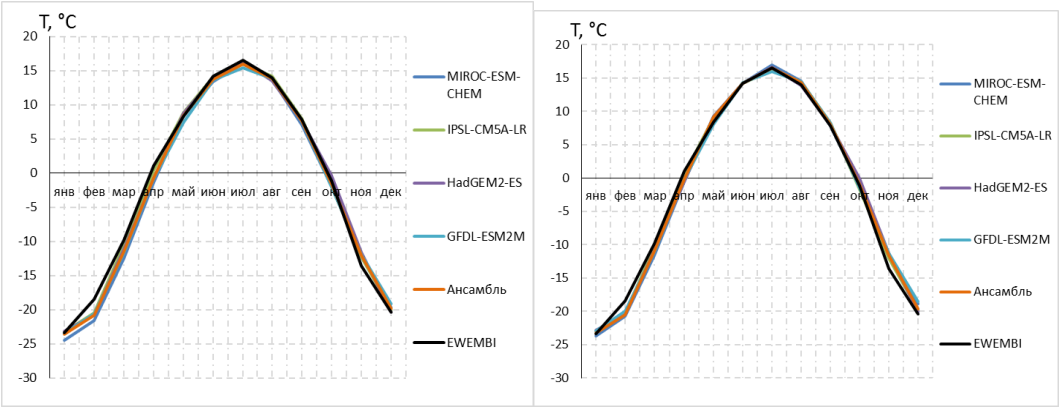

Рисунок 4.1.8 Сезонный ход температуры воздуха в бассейне р. Селенги по данным реанализа EWEMBI и глобальных моделей климата за период 1996-2005 гг. (слева – без коррекции, справа – с коррекцией данных глобальных моделей)

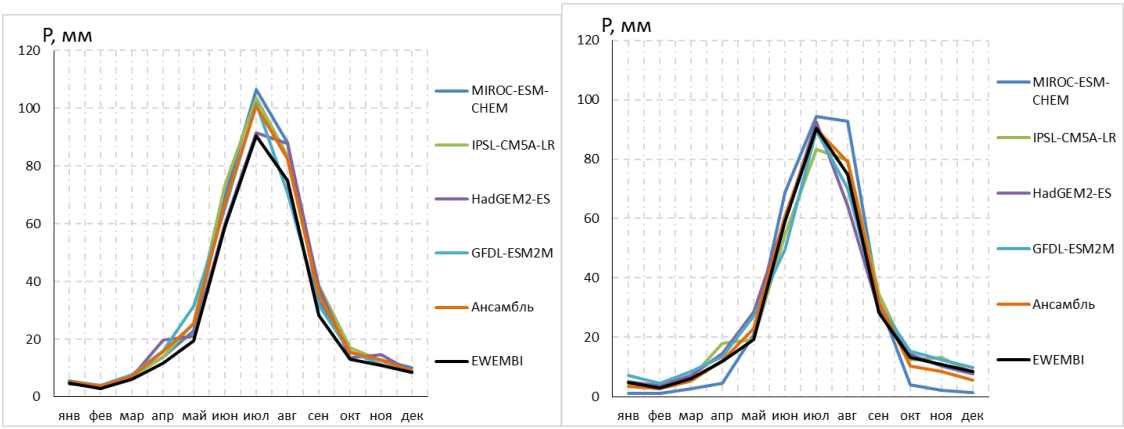

Рисунок 4.1.9 Сезонный ход количества осадков в бассейне р. Селенги по данным реанализа EWEMBI и глобальных моделей климата за период 1996-2005 гг. (слева – без коррекции, справа – с коррекцией данных глобальных моделей)

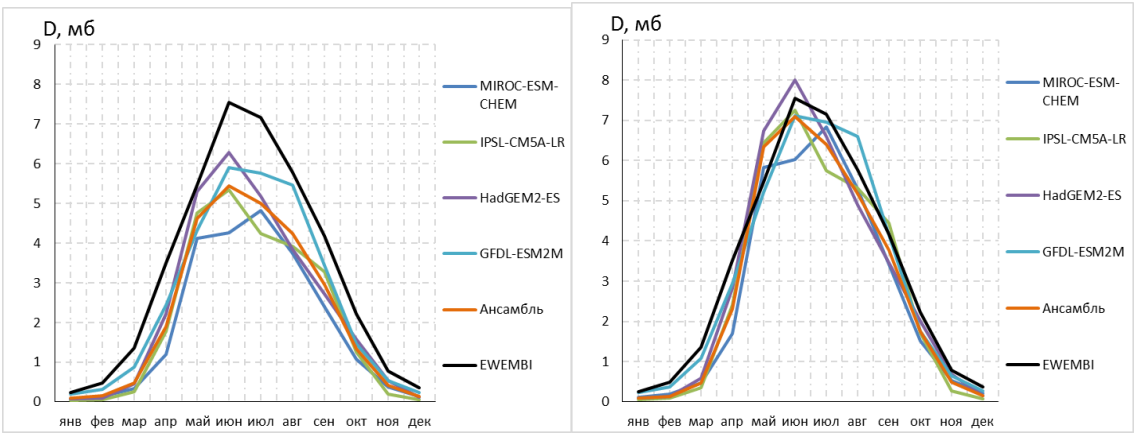

Рисунок 4.1.10 Сезонный ход дефицита влажности в бассейне р. Селенги по данным реанализа EWEMBI и глобальных моделей климата за период 1996-2005 гг. (слева – без коррекции, справа – с коррекцией данных глобальных моделей)

Из рисунков видно, что до коррекции данных расчетов по GCMs имелись сильные расхождения в сезонном ходе осадков для маловодного периода и, особенно, дефицита влажности воздуха для обоих периодов. Однако, после дополнительной коррекции ситуация заметно улучшилась, особенно по среднему из ансамбля GCMs для маловодного периода 1996-2005 гг.

Скорректированные на региональном уровне расчетные данные GCMs задавались в качестве входных данных в модель формирования стока р. Селенги. Результаты моделирования по этим данным сезонного хода речного стока показаны на рисунках 4.1.11-4.1.12. Здесь же показаны результаты моделирования по нескорректированным данным. Видно, что до процедуры коррекции среднемноголетние гидрографы, рассчитанные за исторический период 1996-2005 гг., завышали (по некоторым GCMs более, чем в 2 раза) сток в период межени, а также при прохождении половодья и летне-осенних паводков по сравнению с фактическим стоком Селенги (Рис.4.1.12). Это объясняется завышением количества осадков и уменьшением испарения по сравнению со средними величинами, определенными по данным реанализа EWEMBI. После процедуры коррекции основные фазы водного режима р. Селенги стали более точно

воспроизводиться для маловодного периода 1996-2005 гг. большинством из отобранных GCMs. Для многоводного периода 1986-1995 гг. качество воспроизведения сезонных изменений речного стока так же улучшилось, хотя и не так заметно (Рис.4.1.11).

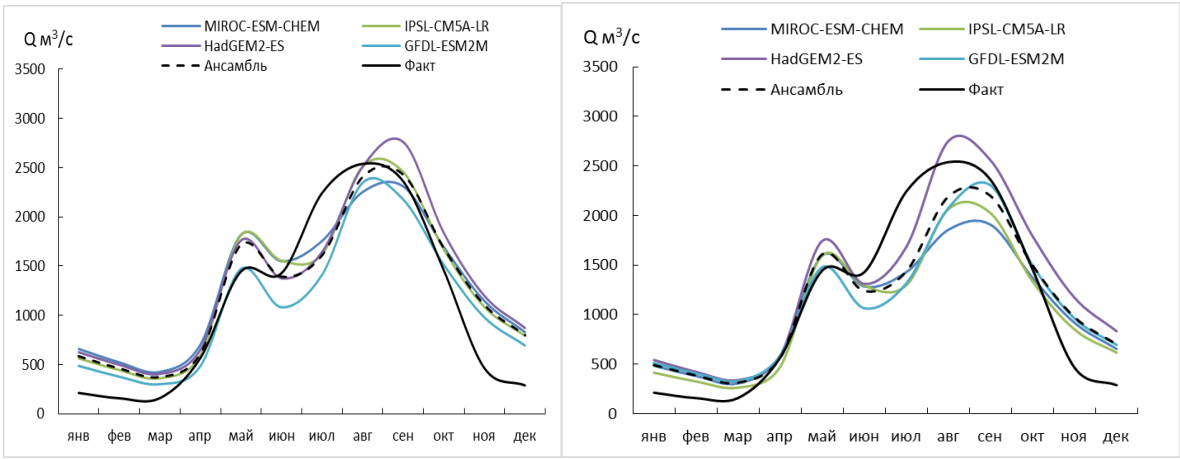

Рисунок 4.1.11 Среднемноголетние гидрографы стока Селенги, рассчитанные с помощью гидрологической модели по исходным (слева) и скорректированным (справа) данным глобальных моделей климата за 1986-1995 гг.

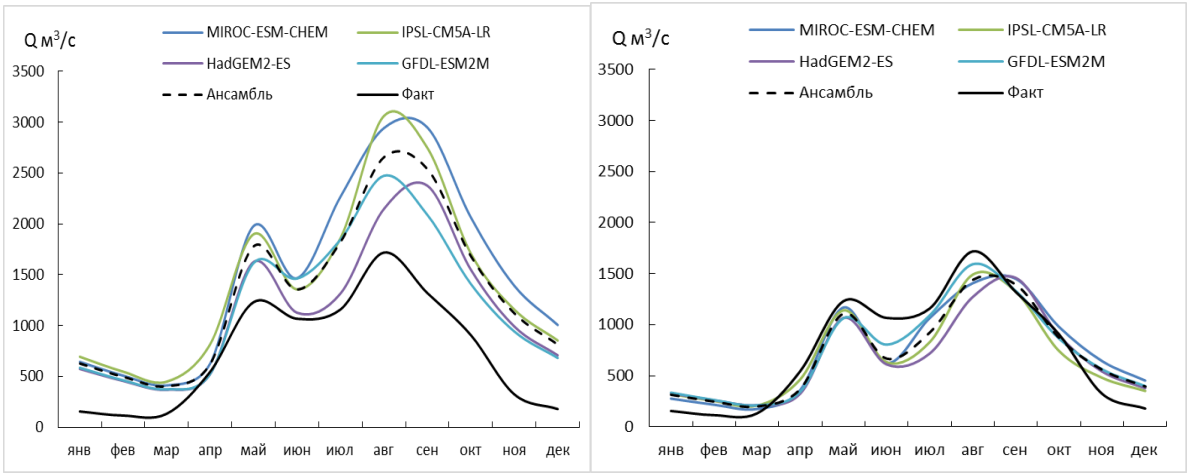

Рисунок 4.1.12 Среднемноголетние гидрографы стока Селенги, рассчитанные с помощью гидрологической модели по исходным (слева) и скорректированным (справа) данным глобальных моделей климата за 1996-2005 гг.

Погрешности расчета среднемноголетней нормы годового стока с использованием скорректированных данных GCMs так же существенно снизились, особенно для маловодного периода 1996-2005 гг. (Рис.4.1.13). Рассчитанный среднемноголетний сток р. Селенги по данным реанализа за этот период составляет 741 м^3/с. Относительная погрешность расчета речного стока по ансамблю GCMs составила в среднем 4 % (по нескорректированным данным ошибка расчета составляла почти 80%) (Табл.4.1.3). Коэффициент вариации стока, рассчитанный за десятилетний многоводный период по данным реанализа EWEMBI составил 0.18, а средняя погрешность его определения по данным GCMs составила 17% (C_v = 0.15). Для многоводного периода 1986-1995 гг. расчеты среднемноголетнего годового стока после дополнительной процедуры коррекциии

данных GCMs тоже улучшились. Рассчитанный среднемноголетний сток р. Селенги по данным реанализа за этот период составляет 1116 м^3/с. Относительная погрешность расчета речного стока по ансамблю GCMs составила в среднем около 2 % (по нескорректированным данным ошибка расчета составляла почти 14%) (Табл.4.1.3). Коэффициент вариации стока, рассчитанный за десятилетний маловодный период по данным реанализа EWEMBI составил 0.18, а средняя погрешность его определения по данным GCMs составила 18% (C_v =0.21).

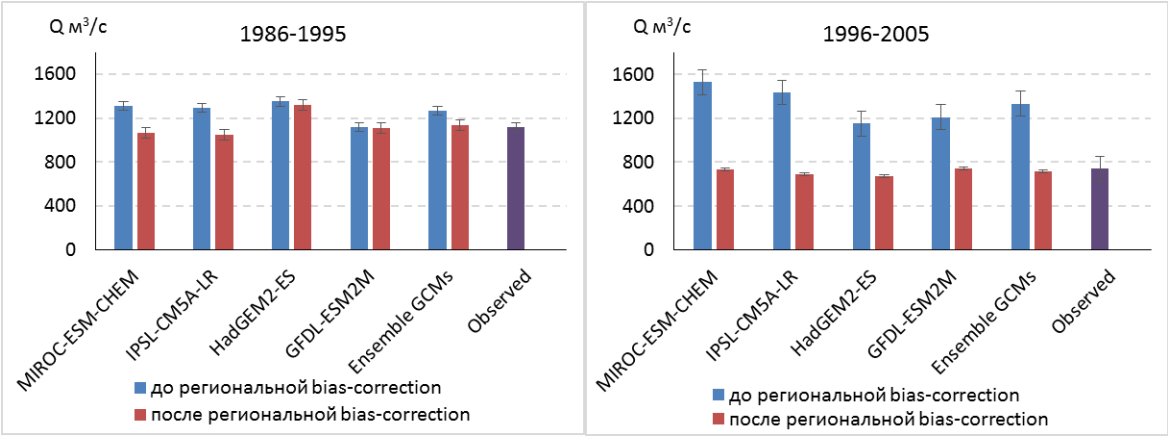

Рисунок 4.1.13 Оценка среднегодового расхода воды р. Селенги за 1986-1995 и 1996-2005 гг. по данным GCMs до и после их коррекции.

Таблица 4.1.3 Среднемноголетняя норма годового стока Селенги, рассчитанная с помощью гидрологической модели по исходным и скорректированным данным глобальных моделей климата за многоводный (1986-1995 гг.) и маловодный (1996-2005 гг.) периоды

Модель	Многоводный период				Маловодный период			
	Исходные данные GCMs		Скорректиро-ванные данные GCMs		Исходные данные GCMs		Скорректиро-ванные данные GCMs	
	Сток, м^3/с	Отн. погр. расчета стока, %	Сток, м^3/с	Отн. погр. расчета стока, %	Сток, м^3/с	Отн. погр. расчета стока, %	Сток, м^3/с	Отн. погр. расчета стока, %
HadGEM2-ES	1350	21.0	1106	-0.9	1150	55.2	674	-9.04
IPSL-CM5A-LR	1294	15.9	1050	-5.9	1434	93.5	689	-7.02
MIROC-ESM-CHEM	1310	17.4	1068	-4.3	1527	106	738	-0.40
GFDL-ESM2M	1115	-0.08	1316	-17.9	1209	63.2	741	0.04
Ансамбль GCMs	1267	13.6	1135	1.7	1330	79.5	711	-4.1
Реанализ EWEMBI	1116				741			

Стоит отметить, что систематические ошибки каждой климатической модели во многом являются случайными по отношению к ансамблю моделей, где они взаимно компенсируются

[Второй оценочный доклад…, 2014]. В связи с этим, при анализе качества модельных расчетов годового стока р. Селенги наблюденные изменения стока сравниваются со средним значением по ансамблю моделей с вычислением стандартных погрешностей (Рис.4.1.13). В работе [Спорышев и др., 2012] указано, что климатические изменения, полученные в результаты расчетов по GCMs за исторический период, могут заметно отличаться от наблюденных изменений не только в силу недостаточной адекватности моделей реальной климатической системы, но и из-за того, что последняя нелинейна и стохастична, а также отсутствует полная информация о начальном состоянии системы и внешних воздействиях на нее.

Кроме сопоставления средних значений годового стока, была оценена возможность воспроизведения по данным GCMs наблюденного тренда годового стока р. Селенги. За многоводный период 1986-1995 гг. для фактического годового стока р. Селенги характерен положительный тренд +33 м^3/с в год. Линейный тренд, аппроксимирующий ансамблевое осреднение результатов гидрологического моделирования по данным GCMs, получился почти таким же и составил +29 м^3/с в год (Рис.4.1.14).

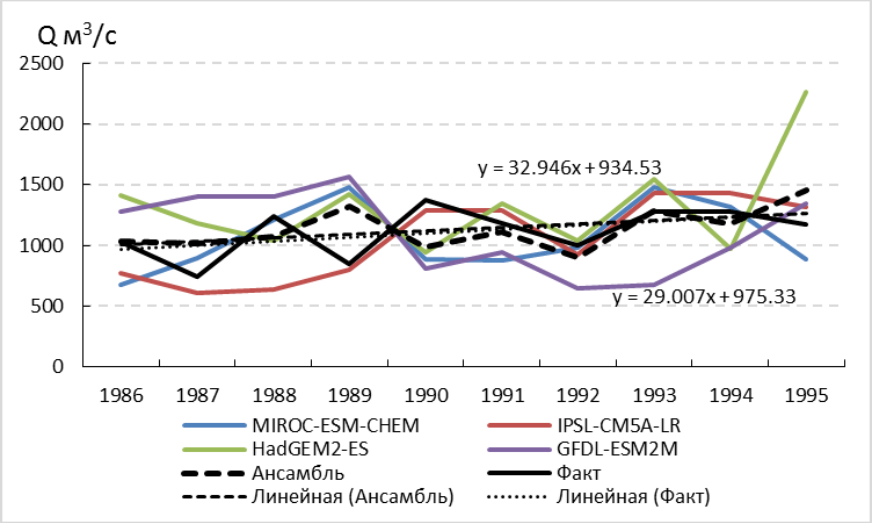

Рисунок 4.1.14 Вариации годового стока р. Селенги, рассчитанного с помощью гидрологической модели по данным GCMs за период 1986-1995 гг.

Для маловодного периода 1996-2005 гг. ситуация складывается иначе. Для фактического годового стока р. Селенги характерен отрицательный тренд -20.6 м^3/с в год, в то время как полученный тренд через осреднение расчетов по ансамблю GCMs получился положительным и составляет +12.4 м^3/с в год (Рис.4.1.15). Подобная разница может быть связана с ориентацией климатических моделей на воспроизведения изменений климата на существенно более продолжительное время, чем 10 лет.

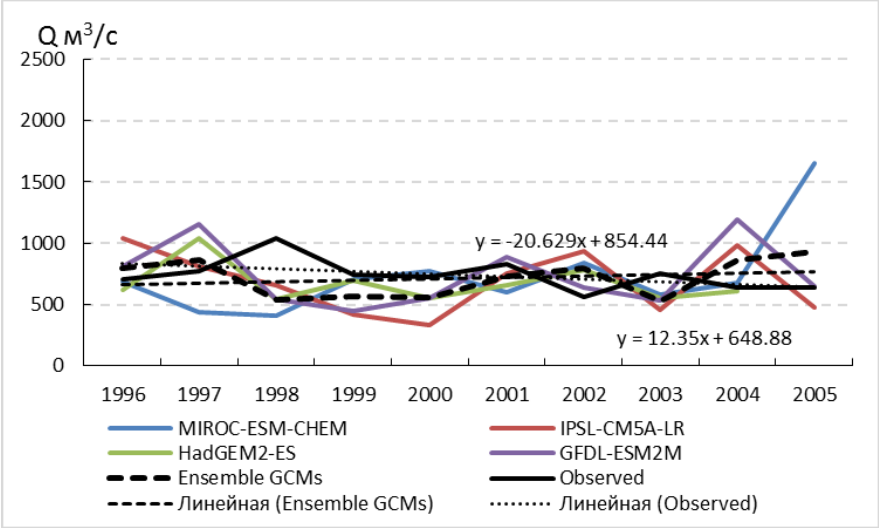

Рисунок 4.1.15 Вариации годового стока р. Селенги, рассчитанного с помощью гидрологической модели по данным GCMs за период 1996-2005 гг.

Объединив два периода, мы видим, что по данным моделей климата после дополнительной корректировки гидрологическая модель позволила с высокой точностью воспроизвести наблюдавшуюся тенденцию систематического снижения годового стока за 20-летний период с 1986 по 2005 годы (Рис.4.1.16).

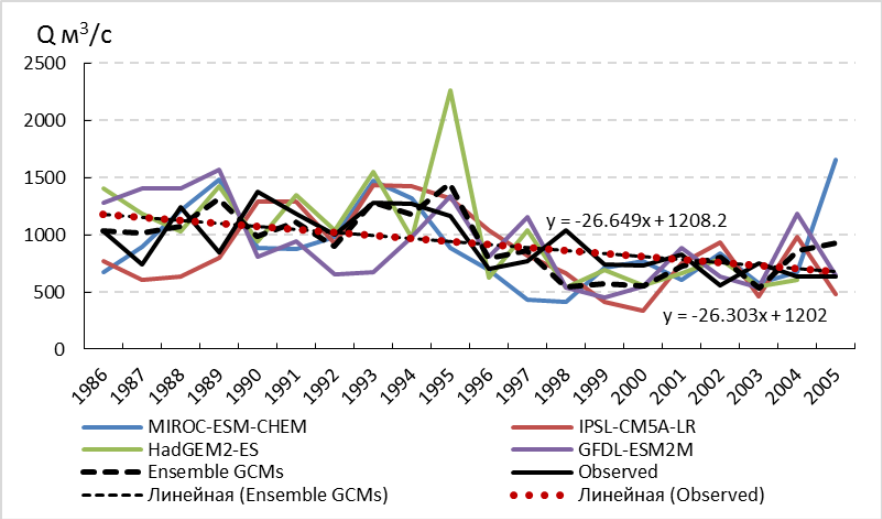

Рисунок 4.1.16. Вариации годового стока р. Селенги, рассчитанного с помощью гидрологической модели по данным GCMs за период 1986-2005 гг.

Сообществом климатологов активно дискутируется вопрос о необходимости использования весовых коэффициентов при ансамблевом осреднении результатов климатических моделей, причем эти коэффициенты должны назначаться в зависимости от конкретных задач и территорий и, собственно, качества моделирования отдельными моделями [Knutti, 2010; Knutti et al., 2010; Weigel et al., 2010]. При этом пока не разработан метод, который можно применить для отбора лучшей модели, чтобы минимизировать межмодельный разброс. Зачастую оказывается, что одни искомые характеристики лучше воспроизводятся одной моделью, а другие – другой.

Например, положительный тренд годового стока р. Селенги за 1986-1995 гг. лучше всего воспроизводят HadGEM2-ES и MIROC-ESM-CHEM (Рис.4.1.17), а отрицательный тренд годового стока р. Селенги за 1996-2005 гг. - HadGEM2-ES и IPSL-CM5A-LR (Рис.4.1.18).

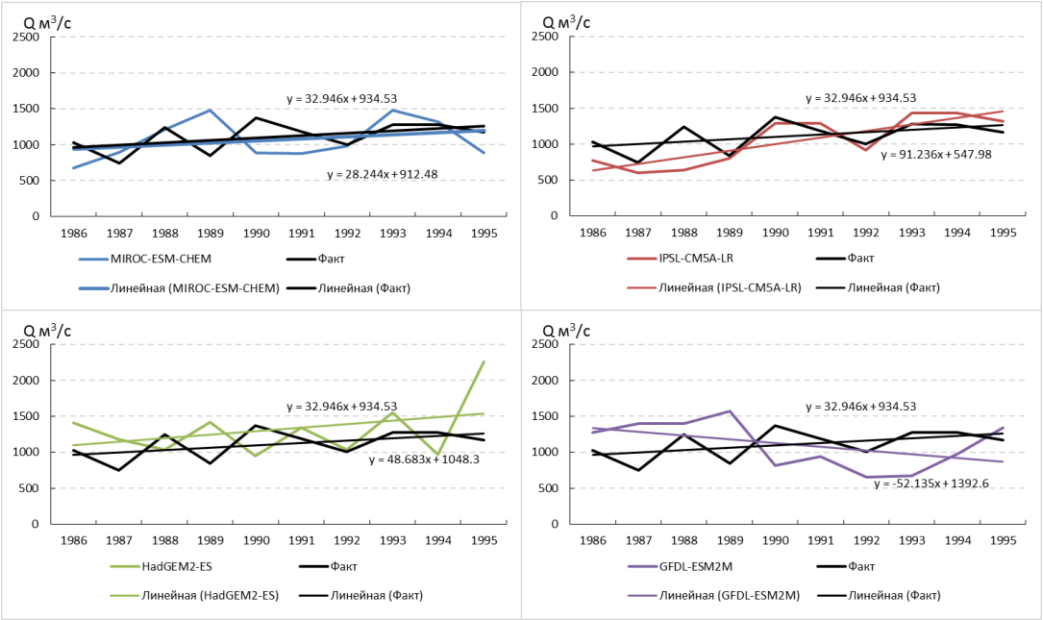

Рисунок 4.1.17 Вариации годового стока р. Селенги, рассчитанного по данным наблюдений на метеостанциях и по данным отдельных GCMs (прямые – линейный тренд) за 1986-1995 гг.

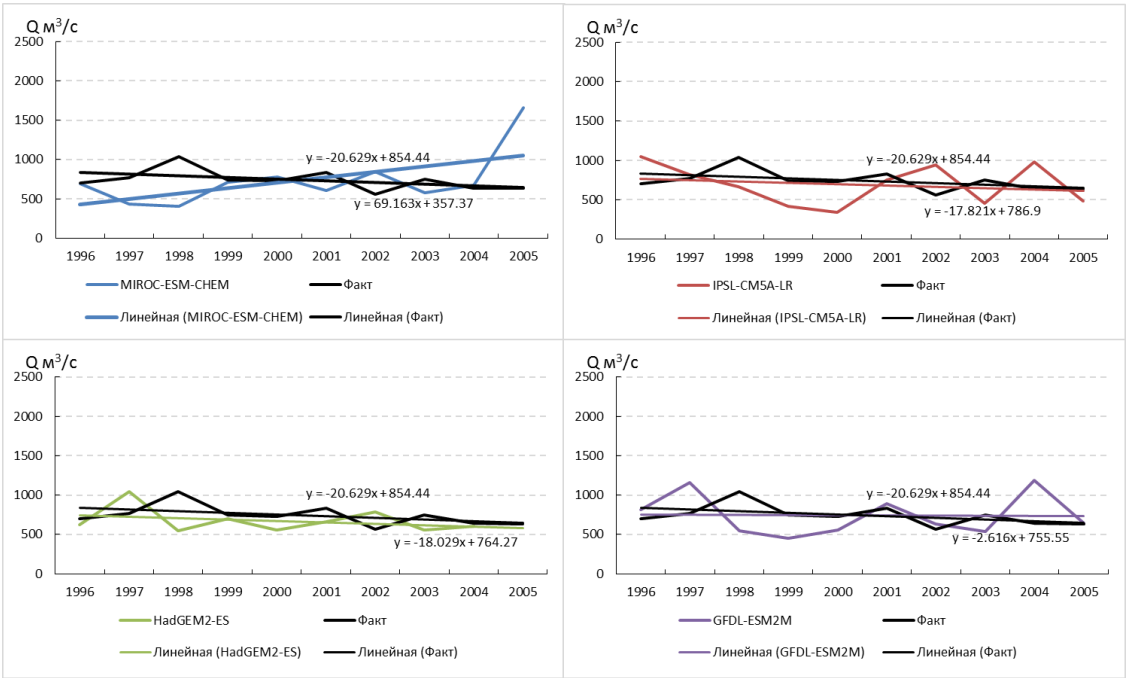

Рисунок 4.1.18 Вариации годового стока р. Селенги, рассчитанного по данным наблюдений на метеостанциях и по данным отдельных GCMs (прямые – линейный тренд) за 1996-2005 гг.

Таким образом, проведенное сопоставление характеристик годового и сезонного стока р. Селенги, рассчитанных с помощью разработанной модели формирования стока по данным глобальных климатических моделей, с характеристиками, рассчитанными по данным реанализа,

продемонстрировало, что несмотря на значительный разброс между отдельными моделями климата характеристики стока, осредненные по ансамблю моделей, рассчитываются с удовлетворительной точностью: погрешности расчета среднего годового стока составляют 3%, а коэффициента вариации годового стока – 17%. Более того, по данным моделей климата гидрологическая модель позволила воспроизвести наблюдавшуюся тенденцию систематического снижения годового стока за 20-летний период с 1986 по 2005 годы.

Полученные результаты позволяют использовать расчетные данные глобальных моделей климата для предвычисления с помощью гидрологической модели возможных аномалий стока р. Селенги в XXI веке. В качестве базового периода, по отношению к которому рассчитывались аномалии стока в XXI веке, был приняты многоводный (1986-1995 гг.) и маловодный (1996-2005 гг.) периоды. Результаты проведенных численных экспериментов описаны в следующем разделе.

4.2 Оценки возможных изменений климата и водного режима в бассейне р. Селенги в XXI веке по данным расчетов глобальных моделей климата

4.2.1 Возможные изменения климата по данным климатических моделей

На основе данных четырех отобранных глобальных климатических моделей для четырех RCP-сценариев будущих антропогенных воздействий получен ансамбль траекторий возможных изменений метеорологических величин в XXI веке с учетом тех же корректирующих коэффициентов, которые были определены отдельно для двух базовых исторических периодов (1986-1995 и 1996-2005 гг.), контрастных по климатическим и гидрологическим признакам.

Для оценки возможных изменений климата использовались две климатические характеристики за этот период: средняя по бассейну р. Селенги температура воздуха и количество осадков. С их помощью оценивались аномалии температуры воздуха (в градусах Цельсия) и суммы осадков (в процентах). На основе рассчитанных климатических проекций для четырех сценариев радиационного форсинга проведено усреднение аномалий климатических характеристик по трем отдельным тридцатилетним периодам XXI века (2010-2939, 2040-2069, 2070-2099 гг.). Результаты, описанные ниже, частично приведены в статье при участии автора [Chalov et al., 2018].

Осредненные по ансамблю климатических проекций аномалии средней по бассейну р. Селенги среднегодовой температуры воздуха в XXI веке для различных сценариев антропогенного воздействия относительно многоводного и маловодного периодов представлены на рисунке 4.2.1.

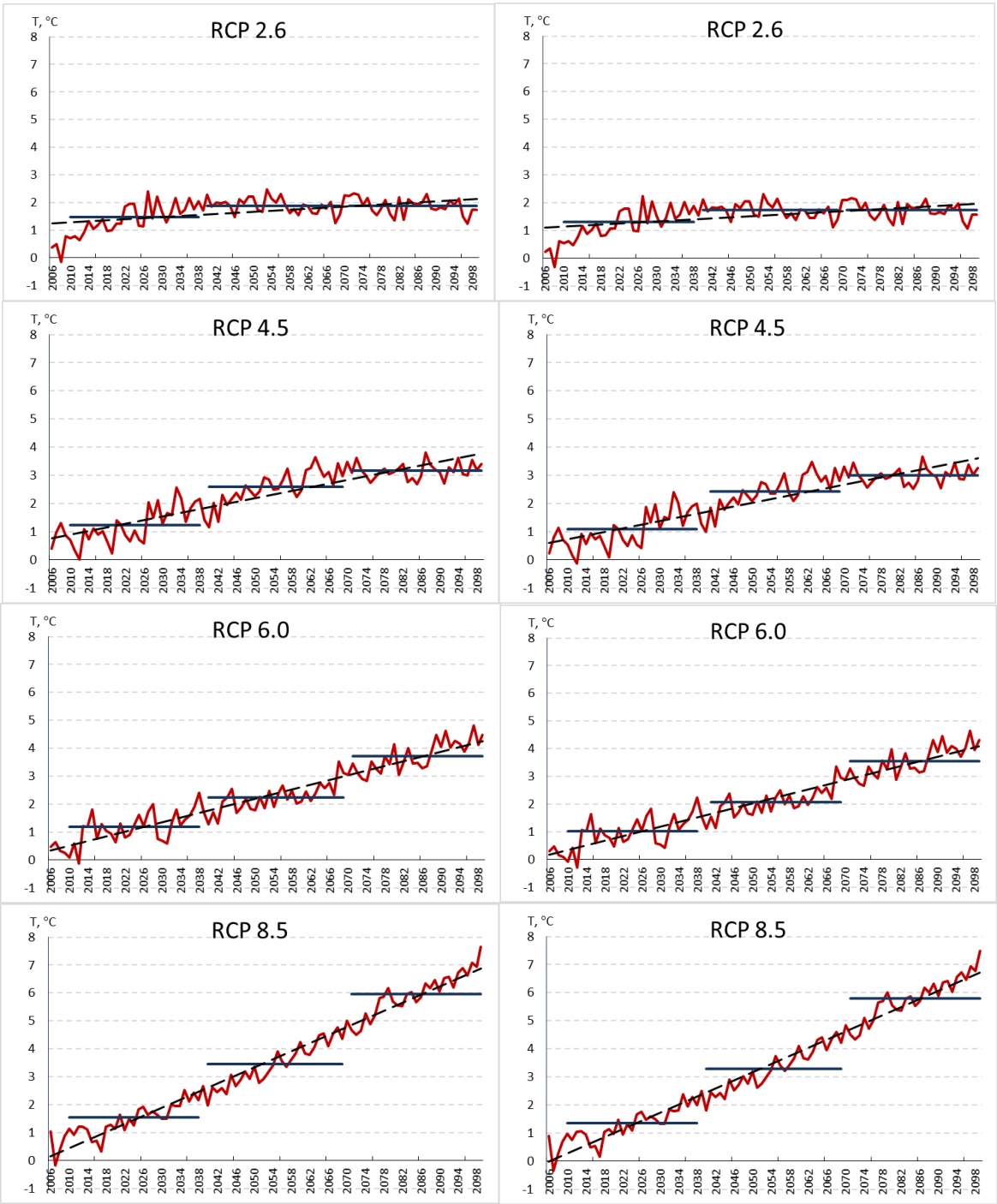

Рисунок 4.2.1 Среднее по ансамблю GCMs изменение аномалий среднегодовой температуры воздуха в бассейне р. Селенги в XXI веке для RCP-сценариев (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 30 лет) относительно базового многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Получены следующие тренды аномалии среднегодовой температуры воздуха относительно многоводного периода: для сценария RCP 2.6 – +1°C/100 лет, RCP 4.5 – 3.25°C/100 лет, RCP 6.0 – 4.2°C/100 лет, RCP 8.5 – 7.3°C/100 лет. Относительно маловодного периода тренды аномалии среднегодовой температуры воздуха получились практически такими же: для сценария RCP 2.6 – +1°C/100 лет, RCP 4.5 - +3°C/100 лет, RCP 6.0 – +4.2°C/100 лет, RCP 8.5 – +7.3°C/100 лет. Анализ температуры, осредненной по тридцатилетним периодам, показал, что для

консервативного сценария RCP 2.6 характерно уменьшение скорости потепления вплоть до его прекращения к концу XXI века, а для остальных трех сценариев – постоянный рост температуры в течение столетия (Рис.4.2.2, Табл.4.2.1). Относительно базовых периодов для консервативного сценария RCP 2.6 наиболее интенсивное потепление возможно в ближайший период 2010-2039 гг., для умеренного сценария RCP 4.5 – в период 2040-2069 гг., при этом для более жестких сценариев RCP 6.0 и RCP 8.5 наибольшее потепление сдвигается на 2070-2099 гг. Наибольший рост температуры воздуха характерен для самого жесткого сценария RCP 8.5 между периодами 2040-2069 и 2070-2099 гг. (+2.5°C).

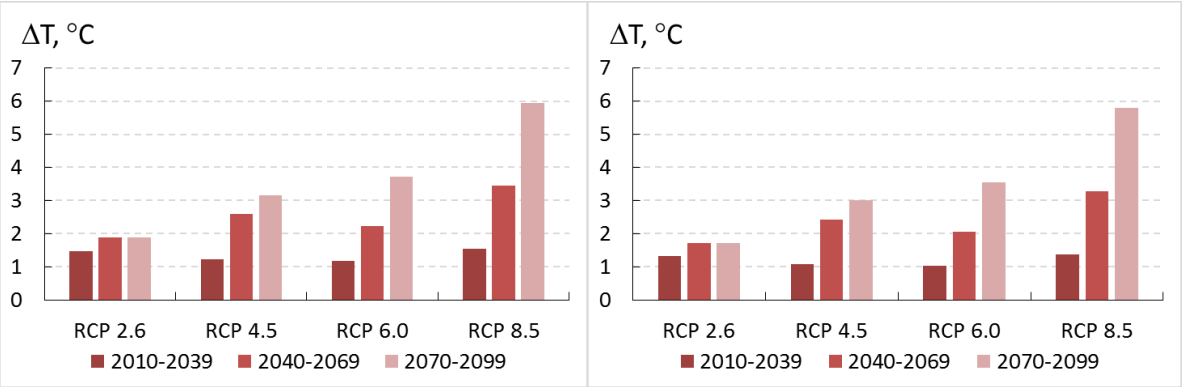

Рисунок 4.2.2 Осредненное по 30-ти летним периодам среднее по ансамблю GCMs изменение среднегодовой температуры воздуха в бассейне р. Селенги в XXI веке для различных RCP-сценариев относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Таблица 4.2.1 Аномалии средней по бассейну р. Селенги ансамблевой среднегодовой температуры воздуха (^{0}C), осредненной по периодам XXI века, при различных RCP-сценариях

Сценарий / Период	По отношению к многоводному периоду (1986-1995 гг.)				По отношению к маловодному периоду 1996-2005 гг.			
	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2010-2039	1.03	1.37	1.03	1.37	1.48	1.24	1.19	1.53
2040-2069	2.06	3.28	2.06	3.28	1.89	2.60	2.23	3.44
2070-2099	3.56	5.79	3.56	5.79	1.89	3.17	3.72	5.95

Аналогично были получены результаты для годового количества осадков при анализе ансамбля модельных расчетов. На рисунке 4.2.3 приведены графики аномалий среднего по бассейну р. Селенги годового количества осадков в XXI веке при различных сценариях радиационного воздействия относительно тех же двух базовых периодов, которые так же были дополнительно усреднены по трем отдельным тридцатилетним периодам XXI века.

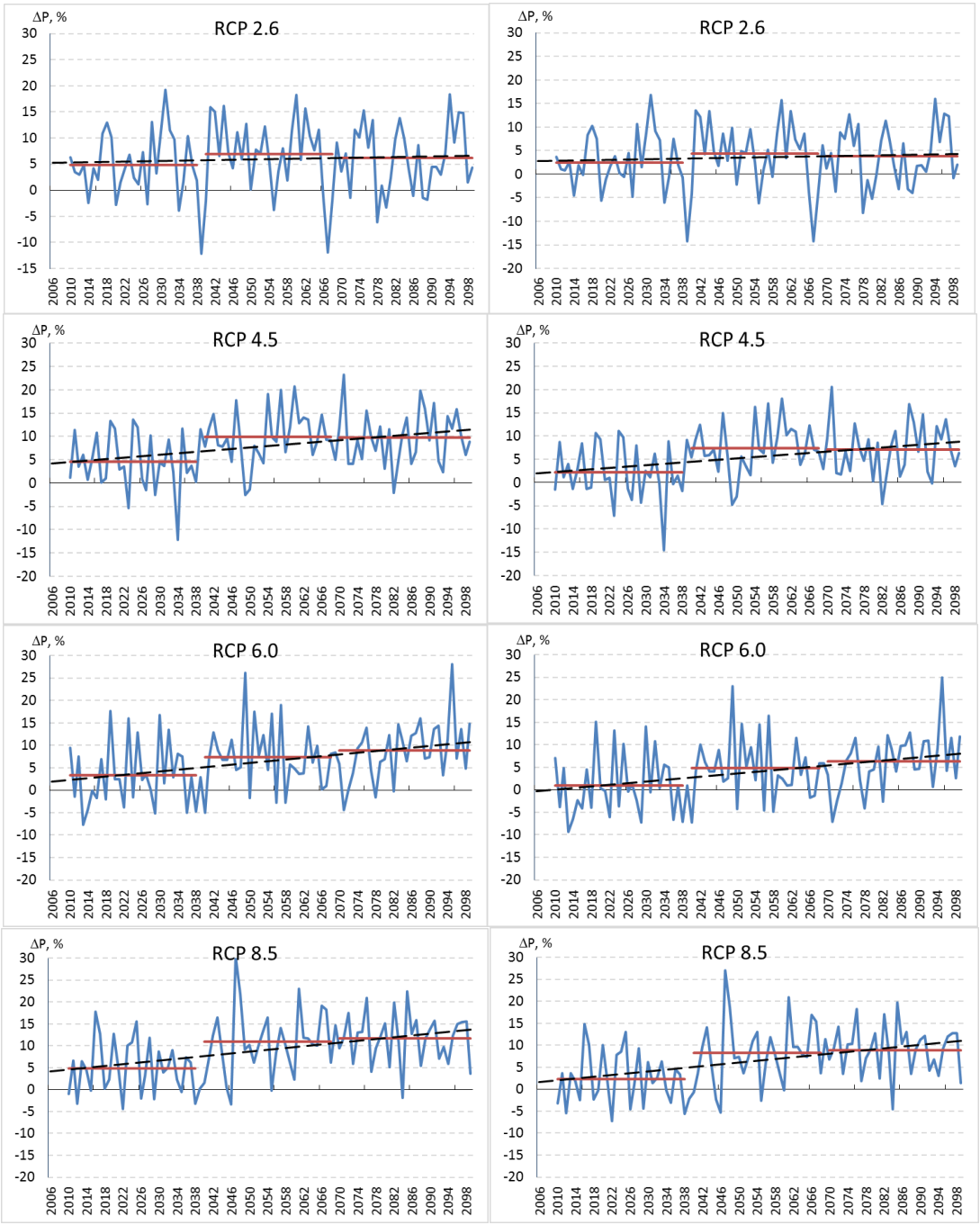

Рисунок 4.2.3 Среднее по ансамблю GCMs изменение годового количества осадков в бассейне р. Селенги в XXI веке для RCP-сценариев (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 30 лет) относительно базового многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Тренды аномалии годового количества осадков относительно многоводного периода для RCP-сценариев получились следующими: RCP 2.6 - +1.5%/100 лет, RCP 4.5 – 7.8+%/100 лет, RCP 6.0 – +9.5 %/100 лет, RCP 8.5 – +10%/100 лет. Относительно маловодного периода: RCP 2.6 - +2.5%/100 лет, RCP 4.5 – +8%/100 лет, RCP 6.0 – +9%/100 лет, RCP 8.5 – +11%/100 лет. То есть, для всех сценариев тренды аномалии годового количества осадков оказались положительными. Стоит отметить, что для сценариев RCP 2.6 и RCP 4.5 характерно увеличение количества осадков до середины XXI века с последующим уменьшением (Рис.4.2.4, Табл.4.2.2). Для остальных же более жестких сценариев в течение всего столетия ожидается постепенный рост скорости

увлажнения бассейна. Наибольший рост осадков характерен также для самого жесткого сценария RCP 8.5 между периодами 2010-2039 и 2040-2069гг (+6%).

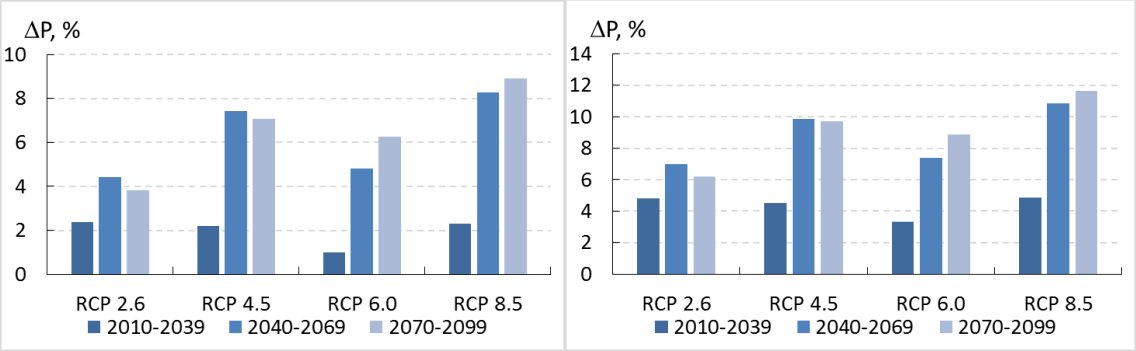

Рисунок 4.2.4 Осредненное по 30-ти летним периодам среднее по ансамблю GCMs изменение годового количества осадков в бассейне р. Селенги в XXI веке, рассчитанное при различных RCP-сценариях относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Таблица 4.2.2 Аномалии среднего по бассейну р. Селенги ансамблевого годового количества осадков (%), осредненного по периодам XXI века, при различных RCP-сценариях

Сценарий / Период	По отношению к многоводному периоду (1986-1995 гг.)				По отношению к маловодному периоду 1996-2005 гг.			
	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 2.6
2010-2039	0.90	2.24	0.90	2.24	4.79	4.52	3.32	4.85
2040-2069	4.76	8.22	4.76	8.22	6.99	9.87	7.37	10.9
2070-2099	6.21	8.88	6.21	8.88	6.19	9.69	8.86	11.6

На рисунках 4.2.5-4.2.6 показаны 30-летние скользящие средние рассчитанных по GCMs проекций аномалий температуры воздуха и суммы осадков в бассейне р. Селенги так же относительно двух периодов. По температуре воздуха существенное расхождение кривых для различных сценариев возможно в середине XXI века, а по количеству осадков – так же начиная со второй половины столетия. Траектории проекций аномалий температуры при сценариях RCP 4.5 и RCP 6.0 в целом схожи и несколько раз пересекаются. Траектории проекций аномалий осадков после 2050-х годов разделяются на две группы: RCP 4.5 и RCP 8.5, RCP 2.6 и RCP 6.0. Первая группа показывает увеличение количества осадков, а вторая - уменьшение, за исключением 2070-2080-х гг. – траектория сценария RCP 6.0 показывает интенсивное увеличение осадков (относительно многоводного периода до 8%, относительно маловодного – до 6%), в то время как траектория сценария RCP 2.6 продолжает демонстрировать их уменьшение. Лишь в конце XXI в. траектория RCP 2.6 показывает резкое увеличение увлажнения бассейна р. Селенги (относительно многоводного периода до 6%, относительно маловодного – до 4%).

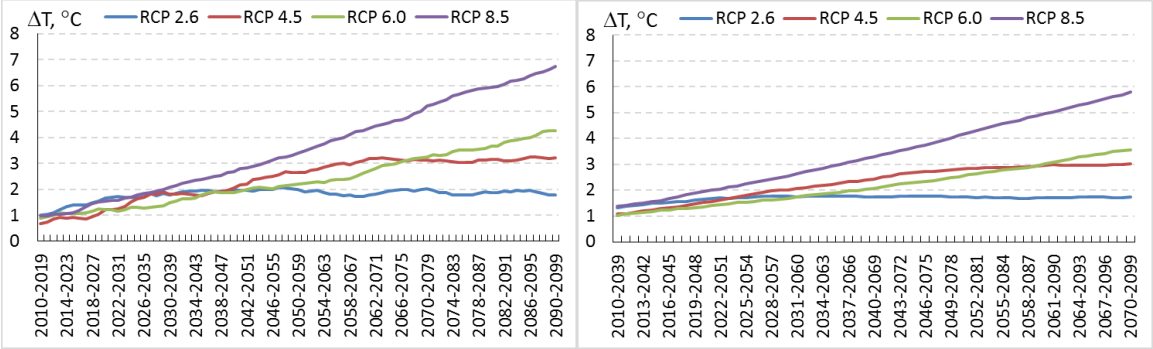

Рисунок 4.2.5 30-летние скользящие средние проекций изменения средней по бассейну Селенги ансамблевой среднегодовой температуры воздуха в XXI веке при различных RCP-сценариях относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

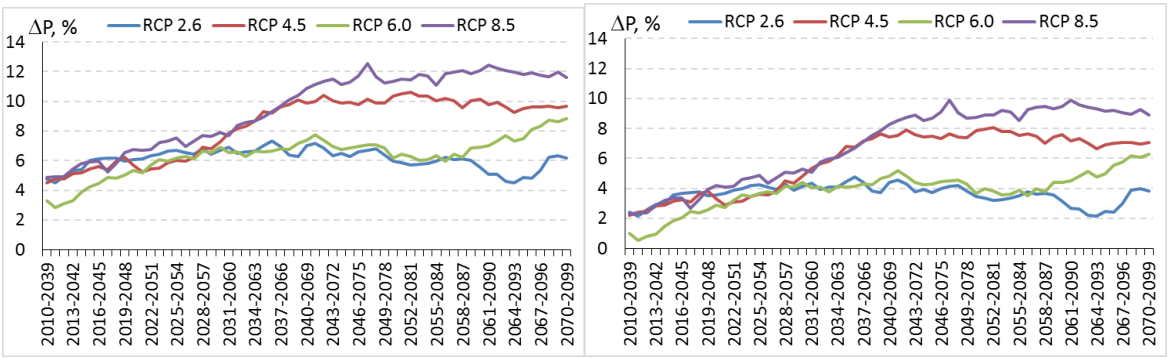

Рисунок 4.2.6 30-летние скользящие средние проекций изменения среднего по бассейну Селенги ансамблевого годового количества осадков в XXI веке при различных RCP-сценариях относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Таким образом, в бассейне р. Селенги при самом «жестком» сценарии радиационных воздействий RCP 8.5 к концу XXI века вероятно существенное увеличение температуры до +6-7°C и увеличение общего количества осадков на 9-12%.

4.2.2 Предвычисление возможных изменений водного режима в XXI веке

С помощью модели формирования стока в бассейне р. Селенги, на входе которой задаются метеорологические величины, рассчитанные по четырем GCMs при различных RCP-сценариях, нами рассчитывался соответствующий этим климатическим траекториям ансамбль многолетних гидрографов стока. Соответственно, было получено 16 гидрографов (четыре GCMs и четыре RCP-сценария). На рисунке 4.2.7 показаны осредненные по ансамблю GCMs изменения годового стока р. Селенги в течение XXI века для различных RCP-сценариев по отношению к двум базовым историческим периодам (1986-1995 и 1996-2005 гг.)

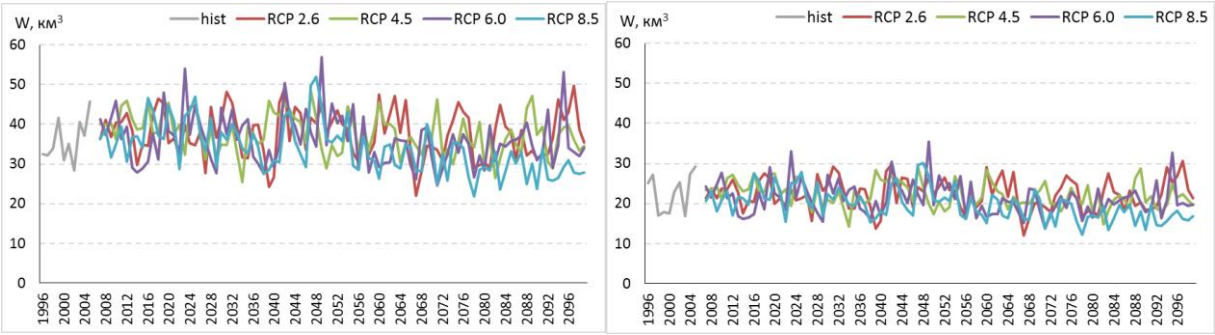

Рисунок 4.2.7 Изменчивость среднего по ансамблю GCMs годового стока р. Селенги в XXI веке при различных RCP-сценариях многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Рассчитанные характеристики стока за определенный период в будущем сравнивались с рассчитанными за соответствующие исторические периоды (1986-1995 1996-2005 гг.), чтобы оценить влияние климатических изменений на среднемноголетний сток. Таким образом, по данным каждой GCM в отдельности были рассчитаны относительные аномалии стока бассейна р. Селенги как отношение изменений рассчитанных среднегодовых значений стока за конкретный год к среднемноголетнему стоку за два базовых периода. На рисунке 4.2.8 продемонстрированы графики относительных аномалий среднего по ансамблю GCMs годового стока р. Селенги для четырех сценариев радиационного воздействия. Тренды аномалии годового стока р. Селенги для всех сценариях относительно многоводного периода получились отрицательными и составили: для RCP 2.6 – -5%/100 лет, RCP 4.5 – -15%/100 лет, RCP 6.0 – -11%/100 лет, RCP 8.5 – -38%/100 лет. Относительно маловодного периода тренды аномалии годового стока чуть замедлились: для RCP 2.6 – -3%/100 лет, RCP 4.5 – -15%/100 лет, RCP 6.0 – -11%/100 лет, RCP 8.5 – -31%/100 лет.

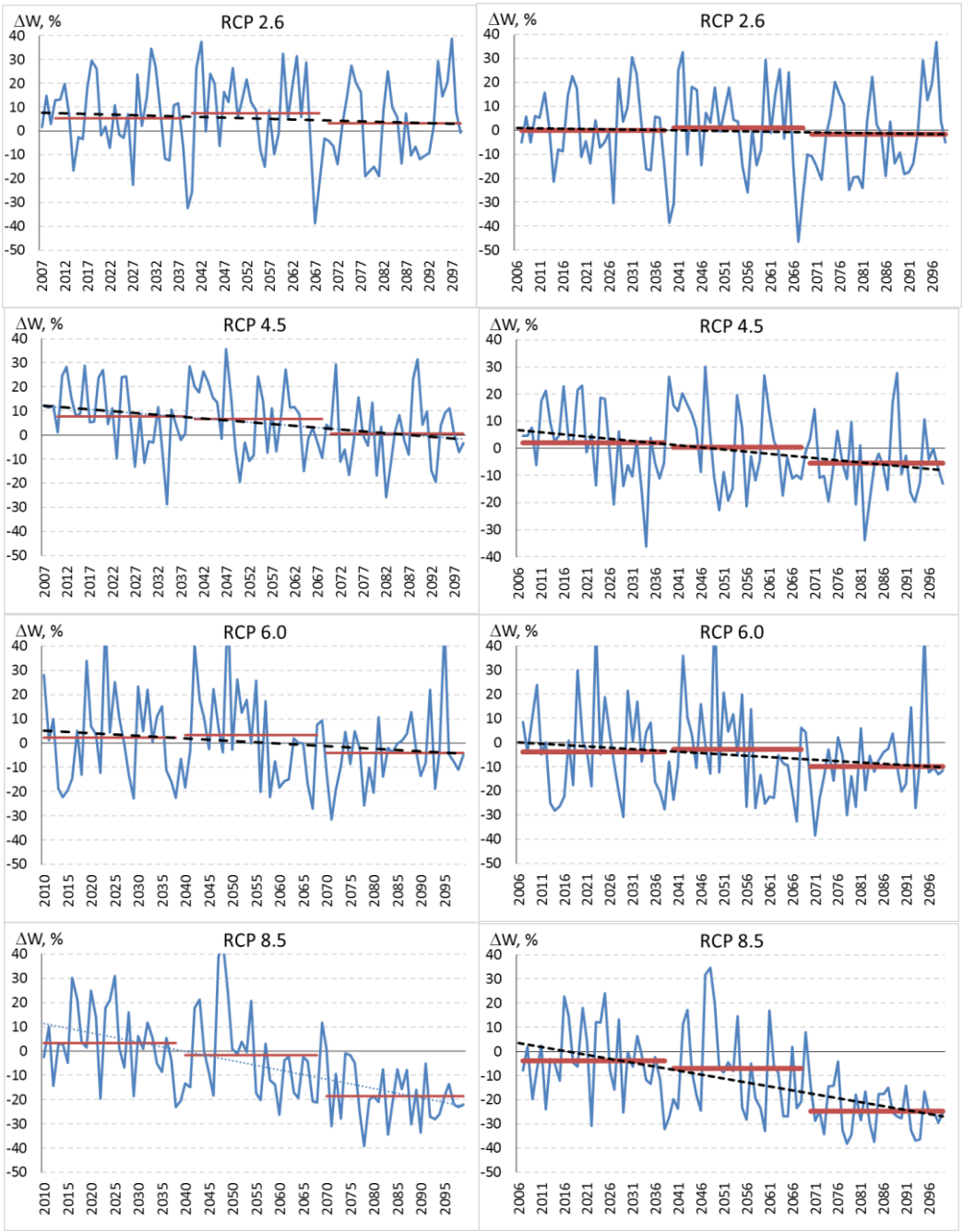

Рисунок 4.2.8 Среднее по ансамблю GCMs изменение рассчитанного годового стока р. Селенги в XXI веке для RCP-сценариев (горизонтальные линии – среднемноголетние значения за 30 лет) относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Были рассчитаны аномалии стока относительно двух исторических периодов по тридцатилетним периодам для четырех сценариев, осредненных по ансамблю GCMs (Рис.4.2.9, Табл.4.2.3). Результаты показали, что относительно многоводного периода (1986-1995 гг.) при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5 и RCP 6.0 к середине столетия возможно незначительное увеличение стока, к концу же века сток сократиться. При самом «жестком» сценарии RCP 8.5 уже к середине столетия возможно уменьшение стока (до 2%), к концу же века сток может уменьшится на 19%. Относительно маловодного периода (1996-2005 гг.) ситуация получается немного другая. При сценариях RCP 2.6 и RCP 4.5 результаты предвычисления показали, что до конца XXI века сток

практически не изменится. При остальных сценариях (RCP 6.0 и RCP 8.5) ожидается сокращение стока на протяжении всего столетия, причем более-менее выраженными эти изменения станут только в конце XXI века. Для самого «жесткого» сценария RCP 8.5 к концу века сток может уменьшиться на 25%.

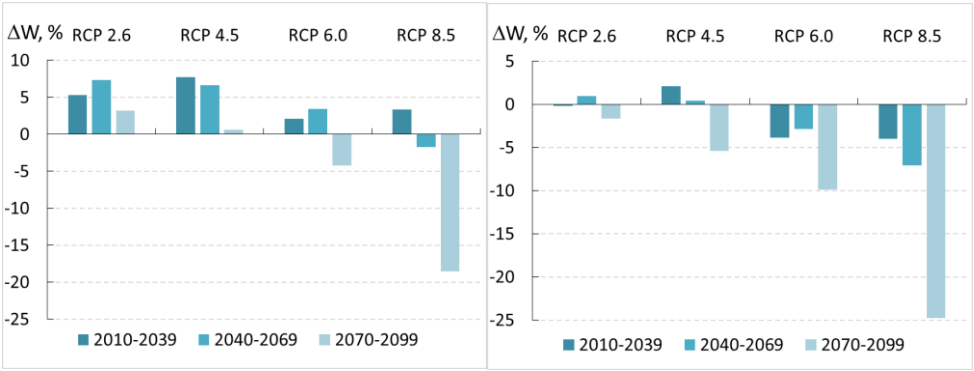

Рисунок 4.2.9 Осредненное по 30-ти летним периодам среднее по ансамблю GCMs изменение стока р. Селенги в XXI веке, рассчитанное при различных RCP-сценариях многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Таблица 4.2.3 Аномалии среднемноголетнего ансамблевого стока р. Селенги (%), осредненного по периодам XXI века, при различных RCP-сценариях

Сценарий / Период	По отношению к многоводному периоду (1986-1995 гг.)				По отношению к маловодному периоду 1996-2005 гг.			
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2010-2039	5.3	7.7	2.1	3.3	-0.2	2.1	-3.9	-4.0
2040-2069	7.3	6.6	3.4	-1.7	0.9	0.4	-2.8	-7.0
2070-2099	3.2	0.6	-4.2	-18.6	-1.7	-5.4	-9.9	-24.7

На рисунке 4.2.10 показаны 30-летние скользящие средние проекций изменений годового стока р. Селенги в XXI веке относительно обоих исторических периодов (Рис.4.2.10).

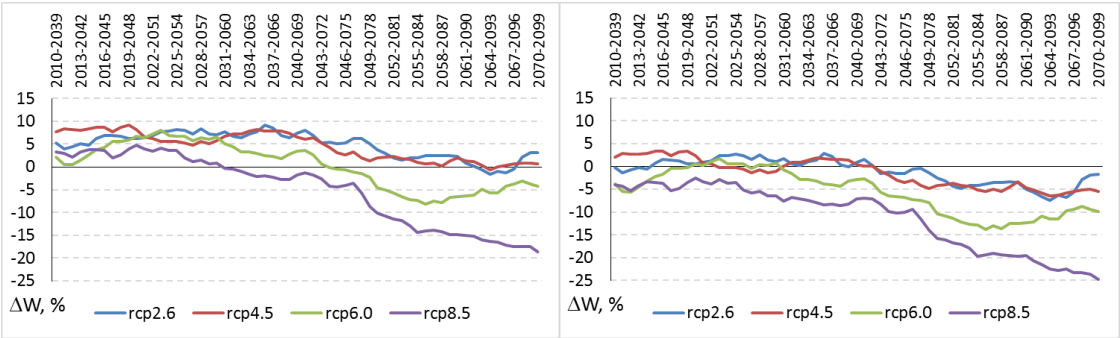

Рисунок 4.2.10 30-летние скользящие средние изменения ансамблевого годового стока р. Селенги в XXI веке при различных RCP-сценариях относительно стока многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Относительно многоводного периода положительная тенденция изменения водности бассейна р. Селенги (от 1 до 9%) отмечена на протяжении практически всего столетия при

сценариях RCP 2.6, RCP 4.5, но к концу XXI века значения изменения ансамблевого годового стока приблизятся к значениям за исторический период (1986-1996 гг.). При сценариях RCP 6.0 и RCP 8.5 положительная тенденция изменения водности характерна лишь для первой половины XXI века. При самом жестком сценарии радиационного воздействия RCP 8.5 к концу столетия возможно сокращение стока до 19%. Относительно маловодного периода положительная тенденция изменения водности бассейна р. Селенги характерная для первой половины XXI века: при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5 в большей степени и в меньшей – при сценарии RCP 6.0. При самом жестком сценарии радиационного воздействия RCP 8.5 возможно сокращение стока на протяжении всего столетия (до 25%). Стоит отметить, что относительно обоих исторических периодов траектории изменения водности при сценариях RCP 2.6 и RCP 4.5 в целом схожи и несколько раз пересекаются – уменьшение водности бассейна р. Селенги в пределах 5-6%. При этом для сценария RCP 6.0 диапазон сокращения водности бассейна р. Селенги в пределах 15%, а при сценарии RCP 8.5 - до 25% относительно обоих периодов.

Далее представлены средние значения изменения годового стока бассейна р. Селенги по тридцатилетним периодам XXI века относительно двух исторических периода отдельно для каждой GCMs при четырех сценариях антропогенного воздействия (Рис.4.2.11). По данным расчетов большинства глобальных климатических моделей для стока бассейна р. Селенги получены отрицательные аномалии для всех сценариев антропогенного воздействия на протяжении всего XXI века, за исключением MIROC-ESM-CHEM и HadGEM2-ES относительно многоводного периода; и GFDL-ESM2M и HadGEM2-ES относительно маловодного периода. По данным GFDL-ESM2M для всех сценариев на протяжении всего XXI века (кроме периода 2010-2039 гг. при сценарии RCP 2.6) возможно увеличение стока (до 40%). По данным HadGEM2-ES: относительно многоводного периода ожидается сокращения стока на протяжении всего столетия (для сценария RCP 8.5 до 40%); относительно же маловодного только при сценариях RCP 2.6, RCP 4.5 для разных периодов сток возможно увеличится (до 10%), при других двух сценариев – уменьшится (до 33%). По данным MIROC-ESM-CHEM: относительно многоводного периода ожидается увеличения стока практически на всем протяжении столетия (для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 до 20%); относительно маловодного периода ожидается сокращение стока на протяжении всего столетия по всем четырем сценариям (для сценария RCP 8.5 до 37%). По данным IPSL-CM5A-LR: относительно многоводного периода ожидается увеличения стока в первой половине XXI века (для сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5 до 5-6%); относительно маловодного периода ожидается сокращение стока на протяжении всего столетия по всем четырем сценариям (для сценария RCP 8.5 до 35%). Такие различия между результатами относительно обоих периодов возможно связаны с корректирующими коэффициентами для метеорологических характеристик. Стоит отметить, что результаты расчетов относительно

маловодного показали возможное сокращение стока бассейна р. Селенги по данным трех моделей климата (GFDL-ESM2M, MIROC-ESM-CHEM, IPSL-CM5A-LR) при двух последних сценариях для периода 2070-2099 гг. примерно в одинаковом диапазоне: при RCP 6.0 в пределах 25%, при RCP 8.5 – 35%.

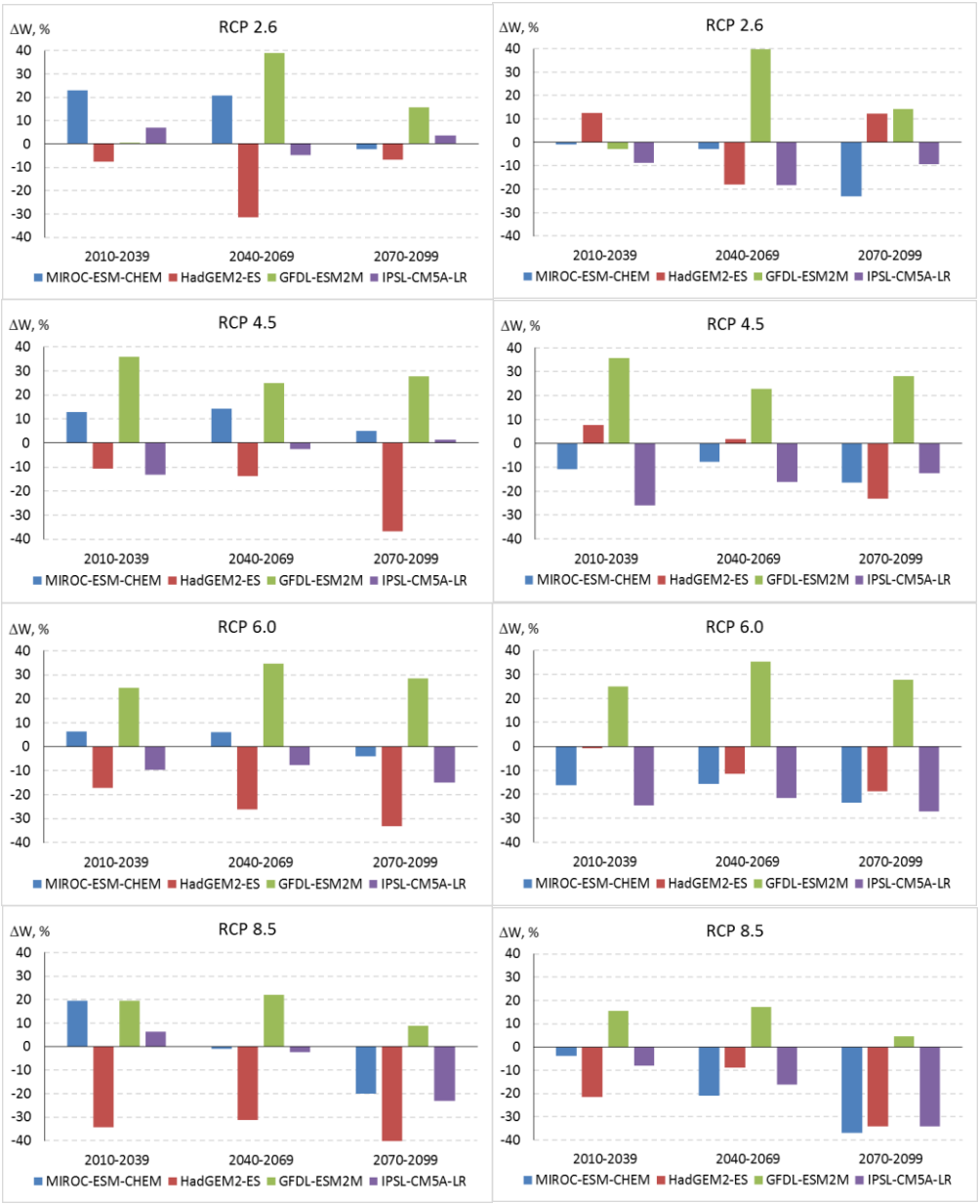

Рисунок 4.2.11 Изменение годового стока р. Селенги по периодам XXI века для различных глобальных моделей климата для четырех RCP-сценариев относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периода

Были проанализированы изменения вариаций межгодовой изменчивости стока р. Селенги, выраженной в виде коэффициентов вариации *Cv*, в пределах выделенных тридцатилетних периодов при различных сценариях радиационного воздействия (Рис.4.2.12). При всех сценариях характерно увеличение *Cv* к середине XXI века с последующим уменьшением. При сценарии RCP 4.5 изменчивость *Cv* слабо выражена в течение всего столетия, в то время как при самом

жестком сценарии RCP 8.5 ко второй половине столетия возможно значительное уменьшение *Cv* (относительно многоводного периода на 0.05, относительно маловодного -на 0.08).

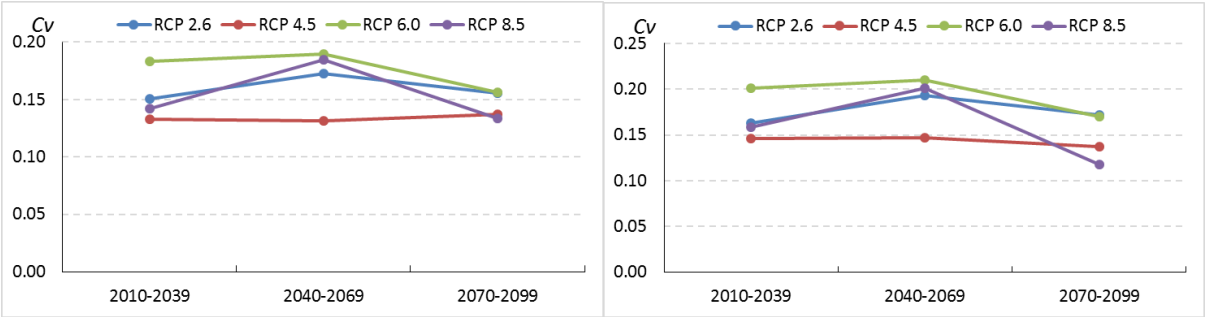

Рисунок 4.2.12 Изменение коэффициента вариации объемов годового ансамблевого стока р. Селенги по периодам XXI века при различных сценариях антропогенного воздействия относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

4.3 Анализ неопределённости расчетных оценок возможных изменений стока р. Селенги в XXI веке

Существующие расчетные оценки возможных изменений речного стока в XXI веке характеризуются значительной неопределенностью. Несмотря на то, что больших разногласий в отношении повышения температуры, смоделированного различными глобальными моделями климата, при определенных условиях сценария нет, в предвычислении тенденций выпадения осадков существует большая изменчивость и неопределенность [IPCC, 2013]. Только на 35.4% площади поверхности суши как минимум 80% ансамблевых проекций выпадения осадков согласуется с направлением тренда за исторический период [van Vuuren et al., 2011]. Судя по результатам, представленными в работе [Hattermann et al., 2018], в основном монгольская часть бассейна Селенги попала в зону, где тенденции выпадения осадков не согласуются с направлением тренда за исторический период.

При построении оценок изменений стока на основе численных экспериментов с гидрологической моделью, как это описано в предыдущем разделе, основные источники неопределенности содержатся в самой гидрологической модели (несовершенство ее структуры, погрешности задания параметров, краевых условий, пространственной дискретизации, ограниченности имеющегося периода наблюдений и др.) и в использованных климатических проекциях. Для разных климатических и физико-географических условий показано (см., обзор в [Gelfan et al., 2015б]), что влияние источников неопределенности, связанных с гидрологическим моделированием, существенно меньше влияния неопределенности проекций изменения климата.

Неопределенность климатических проекций обусловлена тремя основными факторами (см., например, [Hawkins and Sutton, 2009]):

(1) неопределенностью сценариев радиационных воздействий, используемых при построении климатических проекций. Эта часть неопределенности зависит от разнообразия возможных сценариев внешних по отношению к атмосфере воздействий, включая эмиссию, в т. ч. антропогенную, парниковых газов, изменения концентрации атмосферного озона, вулканической и солнечной активности и т. п. В англоязычной литературе эта составляющая неопределенности климатических проекций называется «scenario uncertainty» – сценарная неопределенность.

(2) модельной неопределенностью («model uncertainty» или «response uncertainty» в англоязычной литературе), которая связана с различиями в структуре моделей климата, параметризации атмосферных процессов и процессов взаимодействия атмосферы с океаном и поверхностью суши, методах даунскейлинга («downscaling»), уравнениях и вычислительных алгоритмах и др. Модельная неопределенность является причиной различий климатических

проекций даже при использовании одинаковых сценариев радиационного форсинга, т. е. при гипотетическом отсутствии сценарной неопределенности.

(3) природной, внутренней изменчивостью климатической системы («климатический шум»), которая не связана с внешними воздействиями и является следствием хаотической динамики атмосферных процессов.

Эти неопределенности затрудняют использование климатических сценариев для оценки последствий изменения климата, в том числе гидрологических [Георгиади и др., 2011, 2014; Бабина и Георгиади, 2016]. Исследованию гидрологического эффекта неопределенности климатических проекций, полученных с помощью современных моделей климата, посвящена обширная литература (обзор содержится, например, в последнем, пятом Оценочном отчете МГЭИК [Flato et al., 2013]. Анализу влияния указанных выше отдельных составляющих неопределенности на возможные изменения гидрологических характеристик и оценке относительного вклада этих составляющих посвящено существенно меньше работ (см., например, последний обзор в [Hattermann et al., 2018]).

Для оценки вклада сценарной и модельной неопределенностей климатических проекций регионального климата в неопределенность полученных оценок изменений годового стока р. Селенги нами применен подход, предложенный в работе [Hattermann et al., 2018] на основе дисперсионного анализа ANOVA, позволяющий учесть вклад отдельных факторов в суммарную дисперсию искомой характеристики, равную (для рассматриваемого нами случая двух факторов):

$$SST = \frac{1}{N_{GCM} N_{RCP}} \sum_{i=1}^{N_{GCM}} \sum_{j=1}^{N_{RCP}} \left(Y_{ij} - \overline{Y} \right)^2 = SS_{GCM} + SS_{RCP} + SS_{GCM*RCP}, \quad (4.3.1)$$

где N_{GCM} – число участвующих в расчетах моделей климата; N_{RCP} – число RCP-сценариев; Y_{ij} - значение аномалии нормы стока, рассчитанной по данным i-й модели климата при *j*-м RCP-сценарии; SS_{GCM} - доля дисперсии искомой величины, вызванная влиянием модельной неопределенности; SS_{RCP} - доля дисперсии искомой величины, вызванная влиянием сценарной неопределенности; $SS_{GCM*RCP}$ - доля дисперсии искомой величины, вызванная совместным эффектом взаимозависимости двух рассматриваемых факторов.

Компоненты SS_{GCM}, SS_{RCP} и $SS_{GCM*RCP}$ дисперсии искомой величины, оцениваются как:

$$SS_{GCM} = \frac{1}{N_{GCM}} \sum_{i=1}^{N_{GCM}} \left(\overline{Y}_{io} - \overline{Y} \right)^2, \quad (4.3.2)$$

$$SS_{RCP} = \frac{1}{N_{RCP}} \sum_{i=1}^{N_{RCP}} \left(\overline{Y}_{oj} - \overline{Y} \right)^2, \quad (4.3.3)$$

$$SS_{RCP*GCM} = \frac{1}{N_{GCM} N_{RCP}} \sum_{i=1}^{N_{GCM}} \sum_{j=1}^{N_{RCP}} \left(\overline{Y}_{ij} - \overline{Y}_{io} - \overline{Y}_{oj} + \overline{Y} \right)^2. \quad (4.3.4)$$

где $\overline{Y}_{io}$ – аномалия, полученная путем осреднения по ансамблю моделей при фиксированном сценарии; $\overline{Y}_{oj}$ – аномалия, полученная путем осреднения по ансамблю сценариев при фиксированной модели; $\overline{Y}$ - общее среднее значение аномалии стока, рассчитанной при всех сочетаниях моделей климата и RCP-сценариев.

Расчеты показали, что вклад «модельной» неопределенности в общую дисперсию оценок расчетных аномалий годового стока намного выше вклада «сценарной» неопределенности. Как видно из рисунка 4.3.1, в начале XXI века доля модельной неопределенности в общую дисперсию оценки расчетных аномалий годового стока составляет порядка 69% (относительно многоводного периода) и 58% (относительно маловодного периода), к середине века вырастит до 88-90%, и к концу века уменьшится до почти 68-72%. Таким образом, в течение всего столетия наибольший вклад в суммарную неопределенность вносит модельный источник и относительно многоводного периода доля модельной неопределенности в общую дисперсию оценки расчетных аномалий годового стока получилась больше, чем относительно маловодного. Доля сценарной неопределенности в начале и середине столетия мала (~2%), но вырастает к его концу до 17-18%. 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. Суммарный вклад неопределенности, связанной с взаимозависимостью модельного и сценарного источников в начале века значительно превышает долю сценарного источника (относительно многоводного 29%; относительно маловодного - 39%), а к концу века оказался с ним сравним и, соответственно, составляет 11-14% за счёт уменьшения вклада модельного источника в общую дисперсию оценок расчетных аномалий годового стока р. Селенги. Соответственно, доли сценарной неопределенности и связанной со взаимосвязью двух источников относительно многоводного периода получилась меньше, чем относительно маловодного.

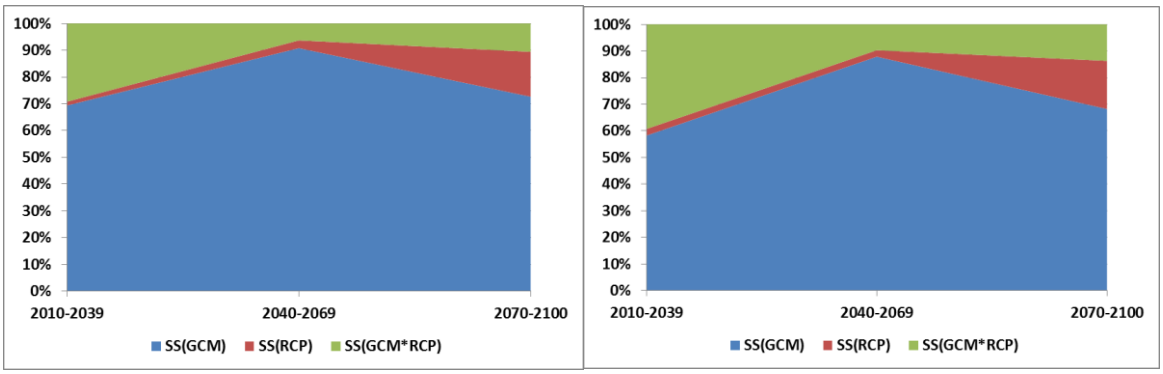

Рисунок 4.3.1 Изменение доли (в %) модельной SS_{GCM} (синее поле), сценарной SS_{RCP} (красное поле) и взаимной $SS_{GCM*RCP}$ (зеленое поле) неопределенностей в общую дисперсию рассчитанных аномалий годового стока р. Селенги в XXI веке относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

4.4 Анализ чувствительности среднего годового стока р. Селенги к изменению климатических параметров по данным глобальных моделей климата

Исследования, описанные в данном разделе, направлены на оценку чувствительности расчетной величины годового стока р. Селенги к прогнозируемым климатическим параметрам.

По схеме DC-метода, аналогичной описанной в разделе 3.1, нами был проведен локальный анализ чувствительности аномалии нормы годового стока бассейна р. Селенги усредненный по ансамблю GCMs. При этом вместо гипотетических, заданных априори изменений климатических параметров, в наблюденные ряды осадков и температуры воздуха вносились постоянные возмущения, равные аномалиям климатических норм соответствующих метеорологических величин в XXI веке, рассчитанным по GCMs.

Зависимости рассчитанных по гидрологической модели аномалий нормы годового стока р. Селенги от рассчитанных по GCMs изменений климатических параметров относительно многоводного (1986-1995 гг.) и маловодного (1996-2005 гг.) приведена в таблице 4.4.1 и аппроксимировалась линейной функцией:

$$\Delta\overline{Y} = 7.1 - 8.4\Delta\overline{T} + 2.1\Delta\overline{P} \qquad (4.4.1)$$

$$\Delta\overline{Y} = 4.62 - 8.3\Delta\overline{T} + 2.1\Delta\overline{P} \qquad (4.4.2)$$

Таблица 4.4.1 Аномалии средней по бассейну р. Селенги ансамблевой среднегодовой температуры воздуха $\Delta\overline{T}$ (^{0}C), ансамблевого годового количества осадков $\Delta\overline{P}$ (%),среднемноголетнего ансамблевого стока $\Delta\overline{Y}$ (%), осредненных по периодам XXI века, при различных RCP-сценариях

Период	Сценарий	По отношению к многоводному периоду (1986-1995 гг.)			По отношению к маловодному периоду (1996-2005 гг.)		
		$\Delta\overline{T}$,°C^{-1}	$\Delta\overline{P}$,%	$\Delta\overline{Y}$,%	$\Delta\overline{T}$,°C^{-1}	$\Delta\overline{P}$,%	$\Delta\overline{Y}$,%
2010-2039	RCP2.6	1,48	4,79	5,27	1,31	2,33	-0,2
	RCP4.5	1,24	4,52	7,74	1,08	2,1	2,1
	RCP6.0	1,19	3,32	2,12	1,03	0,90	-3,9
	RCP8.5	1,53	4,85	3,35	1,37	2,24	-4,0
2040-2069	RCP2.6	1,89	6,99	7,32	1,73	4,34	0,9
	RCP4.5	2,60	9,87	6,62	2,43	7,33	0,4
	RCP6.0	2,23	7,37	3,38	2,06	4,76	-2,8
	RCP8.5	3,44	10,87	-1,71	3,28	8,22	-7
2070-2099	RCP2.6	1,89	6,19	3,16	1,72	3,76	-1,7
	RCP4.5	3,17	9,69	0,61	3,00	7,03	-5,4
	RCP6.0	3,72	8,86	-4,20	3,56	6,21	-9,9
	RCP8.5	5,95	11,62	-18,6	5,79	8,88	-24,7

Связи рассчитанных по гидрологической модели аномалий годового стока с аномалиями, определенными по их зависимостям (4.4.1-4.4.2) от аномалий климатических параметров по GCMs относительно многоводного и маловодного периодов, получились очень тесными (R^2 = 0.96) со среднеквадратической погрешностью расчетов 1.31% и 1.35% соответственно (Рис.4.4.1).

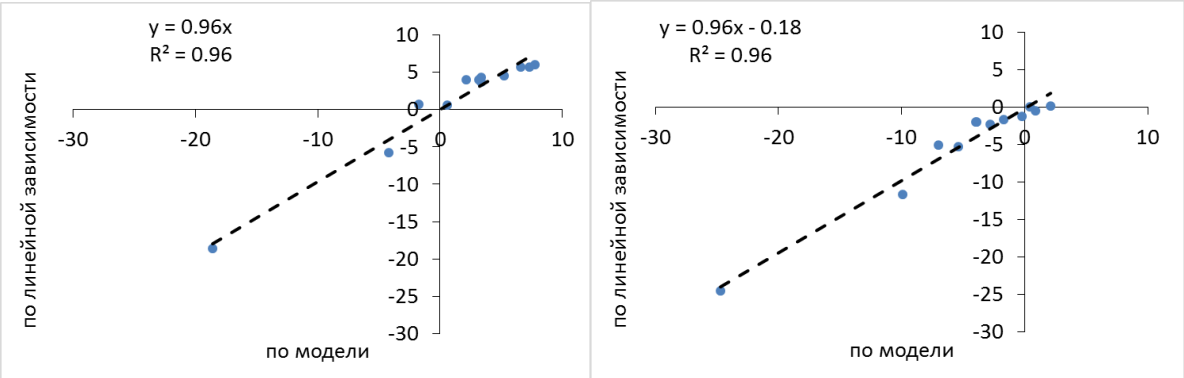

Рисунок 4.4.1. Зависимости между аномалиями среднего годового стока р. Селенги, рассчитанными по модели формирования стока (Табл.4.4.1) и определенными по их линейным зависимостям (4.1.1-4.1.2) от изменений климатических параметров по GCMs относительно многоводного (слева) и маловодного (справа) периодов

Таким образом, коэффициенты чувствительности аномалий нормы годового стока, рассчитанной по гидрологической модели, к изменению климатических параметров, рассчитанных по GCMs относительно многоводного периода, получились равными: $S_{\Delta T}(GCM)$ = -8,4°C^{-1}, $S_{\Delta P}(GCM)$ = 2,1%. Относительно маловодного: $S_{\Delta T}(GCM)$ = -8,3°C^{-1}, $S_{\Delta P}(GCM)$ = 2,1%. Ковариационный эффект (эффект взаимодействия) климатических параметров, описываемый оценкой $S_{\Delta P}(GCM)$, для линейных функций (4.4.1-4.4.2) равен нулю.

Таким образом, анализ чувствительности стока р. Селенги к изменению климатических параметров по данным GCMs показал, что увеличение средней по бассейну нормы температуры воздуха ΔT на 1°C (при неизменной норме осадков) приводит к уменьшению рассчитанного по модели среднемноголетнего годового стока р. Селенги на ~8%. средней по бассейну суммы осадков ΔP 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.

Из сравнения полученных результатов (зависимости 4.4.1-4.4.2) с коэффициентами чувствительности, рассчитанными DC-методом по данным наблюдений (зависимость 3.2.1, Табл. 3.2.4), можно сделать вывод, что аномалии нормы годового стока оказались практически одинаково (с учетом точности оценки коэффициентов в уравнениях регрессии) чувствительны к изменению норм осадков и температуры воздуха. Этот вывод подтверждается графиками связи между значениями нормы годового стока (Рис.4.4.2-4.4.3), рассчитанными по линейным зависимостям (3.2.1) и (4.4.2), иными словами, анализ чувствительности стока по данным

расчетов GCM относительно двух, контрастных по гидрологическим характеристикам, периодов подтверждает выводы, полученные по данным реанализа за исторический период.

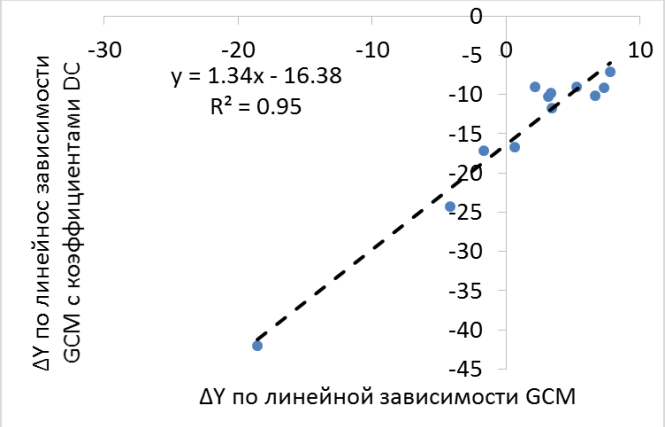

Рисунок 4.4.2 Зависимость между нормами годового стока р. Селенги, рассчитанным по линейным зависимостям (3.2.1) и (4.4.1)

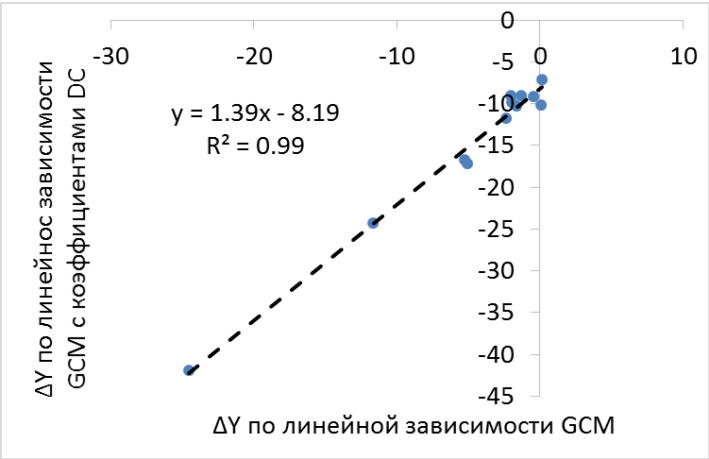

Рисунок 4.4.3 Зависимость между нормами годового стока р. Селенги, рассчитанным по линейным зависимостям (3.2.1) и (4.4.2)

Таким образом, два набора искусственных сценариев климата (построенных с помощью DC-метода и рассчитанных по глобальным климатических моделям) получились близкими, если сравнивать их по среднемноголетнему отклику гидрологической системы бассейна р. Селенги. При этом важно подчеркнуть, что первый набор проекций характеризуется существенно меньшей неопределенностью, т.к. в нем, в отличие от 2-го набора, 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.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы перечислены ниже:

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^2) 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 эффективности модели, рассчитанной 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°С (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°С оказалось менее значимым;

(2) возможный рост среднемноголетней 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 литературы

1. Абасов, Н.В, Бережных, Т.В., Марченко, О.Ю., Ветрова В.В. Пространственно-временная декомпозиция притоков в Ангарский каскад ГЭС в задачах долгосрочного прогнозирования // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Мат. Третьей всероссийской конф. с международным участием. – Барнаул, 2010. – С. 25-28.
2. Алибегова, Ж.Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков. – Л.: Гидрометеоиздат, – 1985. – 228 с.
3. Алисов, Б.П. Климат СССР. – М.: Высшая школа, – 1969. – 104 с.
4. Антохина, О.Ю., Антохин, П.Н., Девятова, Е.В., Мордвинов, В.И. Динамические процессы в атмосфере, обуславливающие аномалии осадков в Восточной Сибири и Монголии в летний период // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. Т 1. – С. 10–27.
5. Афанасьев, А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1976. – 238 с.
6. Бабина, Е.Д., Георгиади, А.Г. Оценка качества воспроизведения температуры воздуха и сумм атмосферных осадков в бассейне р. Лена глобальными климатическими моделями // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. – 2016. – № 5. – С. 69-76.
7. Беспалов, Н.Д. Почвы Монгольской Народной республики // Труды Монгольской комиссии АН СССР. – Изд. АН СССР, вып. 41, – 1951. – 318 с.
8. Бережных, Т.В., Марченко, О.Ю., Абасов, Н.В., Мордвинов, В.И. Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги // География и природные ресурсы. – 2012. Т. 33. № 3. – С. 61–68.
9. Волошин, А.Л., Тулохонов, А.К., Андреев, С.Г., Бешенцев, А.Н., Рупышев, Ю.А. Современные исследования засушливых геосистем Забайкалья // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, – 2006. – С. 301–312.
10. Воропай, Н.Н., Максютова, Е.В., Балыбин,а А.С., Осипова, О.П. Климатические особенности Байкальской природной территории // Мат-лы XV совещания географов Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, 10-13 сентября 2015 г. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. – С. 52-55.
11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014. – 1007 с.
12. Гармаев, Е.Ж., Христофоров, А.В. Расчеты стока рек Бурятии в теплый период года. // Вестник Моск. университета. Сер. № 5 : Геогр., 1996. – №1. – С.99–106.

13. Гармаев, Е.Ж., Евстигнеев, В.М., Христофоров, А.В., Шайбонов, Б.Б. Сток рек Бурятии. – Улан-Удэ: Изд-во Бур. Ун-та, 2000. – 188 с.
14. Гармаев, Е.Ж., Христофоров, А.В. Река Селенга – проблемы использования и охраны водных ресурсов // Вестн. Бурят. ун-та. Сер. Биология, география. – 2009. – Вып. 4. – С. 37–42.
15. Гармаев, Е.Ж., Христофоров, А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. – Новосибирск: ГЕО, 2010. – 227 с.
16. Гельфан, А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 294 с.
17. Гельфан, А.Н., Калугин, А.С., Мотовилов, Ю.Г. Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока // Водные ресурсы, – 2018. Т. 45. № 3. – С.223-234.
18. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П. и др. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
19. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П. и др. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Макс Пресс, 2014. 214 с.
20. Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета. / Под ред. Семенова В., Мягмаржава Б. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 235 с.
21. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып. 14. Бассейн Байкала. – Л: Гидрометеоиздат, 1986. – 363 с.
22. Гунин, П.Д., Казанцева, Т.И., Бажа, С.Н., Данжалова, Е.В., Дробышев Ю.И. Экологические последствия влияния аридизации климата на экосистемы Центральной Монголии // Изменение климата Центральной Азии: социально-экономические и экологическ4ие последствия. Чита: Изд-во ЗабГГПУ, – 2008. – С. 71-84.
23. Гынинова, А.Б., Шоба, С.А., Балсанова, Л.Д., Гынинова, Б.Д. Почвы дельты реки Селенги (генезис, география, геохимия). – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. – 344 с.
24. Давыдова, Т.В., Шагжиев, К.Ш. Почвенный покров и ландшафты среднего течения реки Хилок // Селенга – река без границ. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, – 2002. – С. 84-85.
25. 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.

26. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. – Москва, 2017. - 70 с.
27. Жаков, С. И. Общие закономерности режима тепла и увлажнения на территории СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982 – 231 с.
28. Иванов, В.В., Коротаев, В.Н., Лабутина, И.А. Морфология и динамика дельты р. Селенги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, геогр. – 2007. – № 4. – С. 48–54.
29. Ильичева, Е.А., Корытный, Л.М., Павлов, М.В. Русловая сеть дельты реки Селенги на современном этапе // Вестник Томского государственного университета. — 2014. — № 380. — С. 190-194.
30. Калугин, А.С. Модель формирования стока реки Амур и ее применение для оценки возможных изменений водного режима: дисс. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Калугин Андрей Сергеевич. – М., 2016. – 185 с.
31. Касимов, Н.С., Кошелева, Н.Е., Корляков, И.Д., Сорокина, О.И., Тимофеев, И.В. Экогеохимия городов и промышленных центров в бассейне Селенги / Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения А.И. Перельмана. Под ред. Н.С. Касимова, А.Н. Геннадиева. М.: АПР. – 2017. – С. 253–294.
32. Климатические особенности зоны БАМ. / Под. ред. Ладейщикова Н.П. Тр. Байкальской лимнологической станции. Т.30 (51). – Новосибирск : Наука, 1979. – 144 с.
33. Корытный, Л.М., Ильичева, Е.А., Павлов, М.В., Амосова, И.Ю. Гидролого-морфологический подход к районированию дельты реки Селенги // География и природные ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 47–54.
34. Кучмент, Л.С. Кучмент, Л.С., Демидов, В.Н., Мотовилов, Ю.Г. Формирование речного стока. – М.: Наука, 1983. – 216 с.
35. Кучмент, Л.С., Мотовилов, Ю.Г., Назаров, Н.А. Чувствительность гидрологических систем. – М.: Наука, 1990. – 143 с.
36. Макагонова, М.А. Особенности зимней атмосферной циркуляции в Восточной Азии // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – С. 18-26.
37. Марченко, О.Ю. Условия формирования и долговременные изменения экстремальной водности в бассейне реки Селенги: - дисс. ... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Марченко Ольга Юрьевна – Иркутск, 2013. – . 127 с.
38. Мещерская, А.В., Обязов, В.А., Богданова, Э.Г., Мирвис, В.М., Ильин, Б.М., Сницаренко, Н.И., Голод, М.П., Смирнова, А.А., Обязова, А.И. Изменение климата Забайкалья во второй половине XX века по данным наблюдений и ожидаемые его изменения в первой четверти XXI века. // Труды ГГО – 2009. – Вып. 559. – С.32–57.

39. Морейдо, В.М., Калугин, А.С. Оценка возможный изменений водного режима реки Селенги в XXI в. на основе модели формирования стока // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. № 3. – с. 275–284.
40. Мотовилов, Ю. Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния //В кн. Кучмент Л. С., Музылев Е. Л. (ред) Моделирование гидрологического цикла речных водосборов. Изд-во НГК РАН. – 1993. – С. 9-37.
41. Мотовилов, Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 1 Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы. – 2016а. – Том 43. № 3. – С. 243–253.
42. Мотовилов, Ю.Г. Гидрологическое моделирование речных бассейнов в различных пространственных масштабах. 2 Результаты испытаний // Водные ресурсы. – 2016б. – Том 43. № 5. – С. 467–475.
43. Обязов, В. А. Вековые тенденции изменений климата на юго-востоке Забайкалья и в сопредельных районах Китая и Монголии // Метеорология и гидрология. – 1999. – №10 – С. 33-41.
44. Обязов, В.А., Смахтин ,В.К. Многолетний режим стока рек Забайкалья: анализ и фоновый прогноз // Водное хозяйство России. – 2012. – №1. – С.63–72.
45. Обязов, В.А., Смахтин, В.К. Влияние изменений климата на речной сток в зимний период (на примере Забайкалья) // Метеорология и гидрология. - 2013. – № 7. – С. 95–102.
46. Потемкина, Т.Г. Гидролого-морфологическое районирование устьевой области р. Селенги // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31, № 1. – С. 15–20.
47. Потемкина, Т.Г. Тенденции формирования стока наносов освновных притоков озера Байкал в XX веке и начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 12. С.63–71.
48. Предбайкалье и Забайкалье / Отв. ред. В.С. Преображенский, М.И. Помус, В.Б. Сочава. – М. – Наука. 1965. – 492 с.
49. Промахова, Е.В. Изменчивость мутности речных вод в разные фазы водного режима: дисс. канд. геогр. наук: 25.00.27 / Промахова Екатерина Васильевна. – М., 2016. – 228 с.
50. Птицын, А.Б., Решетова, С.А., Бабич, В.В., Дарьин, А.В., Калугин, И.А., Овчинников, Д.В., Паниззо, В., Мыглан, В.С. Хронология палеоклимата и тенденции аридизации в Забайкалье за последние 1900 лет // География и природ. ресурсы. – 2010. – Т. 31. № 2. – С. 144–147.
51. Реки и озера мира. Энциклопедия. Редкол. В. И. Данилов-Данильян и др. М.: ООО «Издательство «Энциклопения», 2012. – 928 с.
52. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Вып. 3. Бассейн оз. Байкал. – Л.:

Гидрометеоиздат, 1973. – 400 с.
53. Севастьянов, Д.В. Физико-географическое описание бассейна р. Селенги // Водные экосистемы бассейна Селенги / Под ред. Ю.Ю. Дгебуадзе. – М.: Наука, 2009. – С. 22– 51.
54. Синюкович, В. Н. Водный баланс реки Селенги // География и природные ресурсы. – 2010. – №3. – С. 62–68.
55. Синюкович, В. Н., Сизова, Л.Н., Шимараев, М.Н., Курбатова, Н.Н. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал // География и природные ресурсы – 2013. – № 4. – С. 57–63.
56. 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. 2012. – №1 – С. 5–19.
57. Сутырина, Е.Н. Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. – 2015. – Т. 13. – С. 120–130.
58. Убугунова, В.И., Убугунов, Л.Л., Корсунов, В.М., Балабко, П.Н. Аллювиальные почвы речных долин бассейна Селенги. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1998. – 238 с.
59. Фролова, Н.Л., Белякова, П.А., Григорьев, В.Ю., Сазонов, А.А., Зотов, Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги// Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44 – № 3. – С. 243-255.
60. Хажеева, З.И. Водные ресурсы и геохимия речных вод, взвешенных веществ и донных отложений рек бассейна р. Селенга. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук: 25.00.36 – Иркутск, 2014. – 40 с.
61. Чалов, С.Р., Гречушникова, М. Г., Варенцов, М. И., Касимов, Н. С. Современная и прогнозная оценка стока воды и наносов реки Селенги // География и природные ресурсы. – 2016. – № 5. – С. 39–48.
62. Шимараев, М.Н., Куимова, Л.Н., Синюкович, В.Н., Цехановский, В.В. Климат и гидрологические процессы в бассейне оз. Байкал в XX столетии // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 3. – С. 71–78.
63. Экологический атлас бассейна озера Байкал. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. – 145 с.
64. Экосистемы бассейна Селенги / Биологические ресурсы и природные условия Монголии: труды совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции. Т. 44. Отв. ред. Востокова Е.А., Гунин П.Д. – М.: Наука, 2005. – 359 с.
65. Antokhina, O. Yu.; Antokhin, P.N., Martynova, Yu.V. and Mordvinov, V.I. The impact of atmospheric blocking on the spatial distribution of atmospheric summertime precipitation over

Eurasia. IOP Conf. Ser.: Earth. Environ. Sci. – 2016. – Vol. 48. – P. 012035.

66. Antokhina, O. Yu.; Antokhin, P.N., Devyatova E. V. and Martynova, Yu.V. Atmospheric Blockings in Western Siberia. Part 2. Long-term Variations in Blocking Frequency and Their Relation with Climatic Variability over Asia // Russian Meteorology and Hydrology. – 2018. – Vol. 43. Issue 3, – P. 143–151.
67. 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. – 210 p.
68. Batima P., Natsagdorj L., Gombluudev P., Erdenetsetseg B. Observed climate change in Mongolia. AIACC Working. Paper 12. 2005. – 25 p.
69. Batima, P. Climate Change Vulnerability and Adaptation in the Livestock Sector of Mongolia. Final Report, Project AS06, Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC), International START Secretariat, Washington, DC, US. 2006. – 85 p.
70. Batsukh, N., Dorjsuren, D., and Batsaikhan, G. The Water Resources, Use and Conservation in Mongolia (First National Report). Mongolia National Water Committee, Mongolian Ministry of Nature and the Environment, and the Government of the Kingdom of the Netherlands Joint Publication. Ulaanbaatar. 2008.
71. Bergström, S. The HBV model. In: Singh, V.P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology // Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO. –1995. – P. 443-476.
72. Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigao, R.A.P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Canjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gul, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kohnova, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J.L, Sauquet, E., Sraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Zivkovic, N. Changing climate shifts timing of European floods. // Science. – 2017. – Vol. 357. № 6351. – P. 588-590.
73. Bradley, S.B., Vuille, M., Diaz, H.F., Vergara, W. Threats to water supplies in the tropical Andes // Science. – 2006. – Vol. 312. № 5781. – P. 1755-1756.
74. Chalov, S.R., Jarsjo, J, Kasimov, N.S., Romanchenko, A.O., Pietron, J., Thorslund, J., Promakhova, E.V. Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia // Environ Earth Sci. – 2015. – Vol.73. – P.663-680.
75. 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.

76. Dagvadorj, D. Introduction. In: Batjargal Z, Dahvadorj D, Batima P (eds) Mongolia national action programme on climate change // JEMR Publishing, Mongolia, 2000. – P. 1–11.
77. Dashkhuu, D., Kim, J.P., Chun, J.A., Lee, W. Long-term trends in daily temperature extremes over Mongolia // Weather and Climate Extremes. – 2015. – Vol. 8. – P. 26-33.
78. Deea, D.P., Uppalaa, S.M., Simmonsa, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F. The ERA-Interim reanalysis: configuretion and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. – 2011. – Vol. 137. – P. 553–597.
79. 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. 2010. – Vol.14. – P. 651-665.
80. Dzhamalov, R.G., Frolova, N.L., Safronova, T.I., Telegina, A.A., Bugrov, A.A. Distribution and Use of Present-Day Water Resources in European Russia. // Water Resour. – 2015. – Vol. 42. № 1 – P. 28-37. DOI:10.1134/S0097807815010030
81. Euser, T, Winsemius, H. C., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Uhlenbrook, S., and Savenije, H.G., A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2013, Vol. 17 – P. 1893–1912. doi:10.5194/hess-17-1893-2013
82. Ewen, J. and Parkin, G., Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 1, Method // J. Hydrol. – 1996. – Vol. 175. – P. 583–594.
83. FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, Harmonized World Soil Database (version 1.2) – Rome-Laxenburg: FAO, – 2012.
84. 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. 2013. – P. 741-882.
85. Frieler, K., Lange, S., Piontek, F., Reyer, C. P. O., Schewe, J., Warszawski, L., Zhao, F., Chini, L., Denvil, S., Emanuel, K., Geiger, T., Halladay, K., Hurtt, G., Mengel, M., Murakami, D., Ostberg, S., Popp, A., Riva, R., Stevanovic, M., Suzuki, T., Volkholz, J., Burke, E., Ciais, P.,

Ebi, K., Eddy, T.D., Elliott, J., Galbraith, E., Gosling, S.N, Hattermann, F., Hickler, T., Hinkel, J., Hof, C., Huber, V., Jägermeyr, J., Krysanova, V., Marcé, R., Müller Schmied, M., Mouratiadou, I., Pierson, D., Tittensor, D.P., Vautard, R., van Vliet, M., Biber, M.F., Betts, R.A., Bodirsky, B.L., Deryng, D., Frolking, S., D. Jones, C.D., Lotze, H.K., Lotze-Campen, H., Sahajpal, R., Thonicke, K., Tian, H., and Yamagata, Y., Assessing the impacts of 1.5°C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) // Geosci. Model Dev. – 2017. – Vol. 10, № 12. – P. 4321–4345. doi:10.5194/gmd-10-4321-2017

86. Garrick, M., Cunnane, C., and Nash, J.E., A criterion of efficiency for rainfall-runoff models // J. Hydrol. – 1978. – Vol. 36, № 3-4, P. 375–381.
87. Gelfan, A., Motovilov, Y., Krylenko, I., Moreido, V., Zakharova, E. Testing the robustness of the physicallybased ECOMAG model with respect to changing conditions // Hydrol. Sci. J. 2015a. Vol. 60. №7, 8. – P. 1266–1285.
88. Gelfan, A., Semenov, V. A., Gusev, E., Motovilov, Y., Nasonova, O., Krylenko, I., Kovalev, E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2015б. – Vol. 19. – P. 2737-2754. doi:10.5194/hess-19-2737-2015.
89. Gelfan A., Gustafsson D., Motovilov Yu., Arheimer B., Kalugin A., Krylenko I., Lavrenov A. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues // Clim. Change. – 2017. – Vol. 141, P. 499-515. doi 10.1007/s10584-016-1710-5
90. Gelfan, A. N. and Millionschikova, 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–S101.
91. Goosse, H., Barriat, P.Y., Lefebvre, W., Loutre M.F. and Zunz, V. Introduction to climate dynamics and climate modeling, 2010. Online textbook available at http://www.climate.be/textbook.
92. Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F., Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling // J. Hydrol. – 2009. – Vol. 377. – P. 80–91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
93. Haghnegahdar A. An Improved Framework for Watershed Discretization and Model Calibration: Application to the Great Lakes Basin. – Ph.D. thesis, University of Waterloo. – 115 p.
94. Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., Lister, D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. Int. // J. Clim. – 2014. – Vol. 34 – P. 623-642. http://dx.doi.org/10.1002/joc.3711
95. Hasan E., Tarhule A., Kirstetter P-E., Clark III, Hong Y. Runoff sensitivity to climate change in

the Nile River Basin // J. Hydrol. 2018. – Vol. 561. – P. 312-321.

96. Hattermann, F. F., Vetter, T., Breuer, L., Su Buda, Daggupati, P., Donnelly, C., Fekete, B., Flörke, F., Gosling, S.N., Hoffmann, P., Liersch, S., Masaki, Y., Motovilov, Y., Müller, C., Samaniego, L., Stacke, T., Wada, Y., Yang, T. and Krysnaova, V. Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: a cross-scale study // Environ. Res. Lett. – 2018. – Vol. 13. – P.015006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9938

97. Hawkins, E., Sutton, R. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions // B. Am. Meteorol. Soc. – 2009. – Vol. 90. – 1095 p., doi:10.1175/2009BAMS2607.1.

98. Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., Piontek, F. A trend-preserving bias correction – the ISI– MIP approach // Earth Syst. Dynam. – 2013. – Vol. 4. – P. 219–236.

99. Hofmann, J., Watson, V., Scharaw, B. Groundwater quality under stress: contaminants in the Kharaa River basin (Mongolia) // Environmental Earth Sciences. – 2015. – Vol. 73. – P. 629-648.

100. Huang, S., Kumar, R., Flörke, M., Yang, T., Hundecha, Y., Kraft, P., Gao, C., Gelfan, A., Liersch, S., Lobanova, A., Strauch, M., van Ogtrop, F., Reinhardt, J., Haberlandt, U., and Krysanova, V., Evaluation of an ensemble of regional hydrological models in 12 large-scale river basins worldwide // Clim. Change. – 2017. Vol. 141. – P. 381–397. doi:10.1007/s10584-016-1841-8

101. Hülsmann, L., Geyer, T., Schweitzer, C., Priess, J., Karthe, D. The effect of subarctic conditions on water resources: initial results and limitations of the SWAT model applied to the Kharaa River Basin in Northern Mongolia // Environ Earth Sci. – 2015. – Vol. 73. Issue 2. – P. 581–592.

102. Immerzeel, W.W., Droogers P., Jong, S.M.D., Bierkens, M.F.P. Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing // Remote. Sens. Environ. – 2009. – Vol. 113. № 1. – P. 40–49.

103. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noquer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, – 881 p.

104. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, – 996 p.

105. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, Y, Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, – 1535 p.

106. Integrated water management. National Assessment Report. Volume 1. Ministry of nature, environment and green development of Mongolia and water authority. Ulaanbaatar 2012. – 466 p.

107. Karthe, D., Kasimov, N., Chalov, S., Shinkareva, G., Malsy, M., Menzel, L., Theuring, P., Hartwig, M., Schweitzer, C., Hofmann, J., Priess, J., Lychagin, M. Integrating multi-scale data for the assessment of water availability and quality in the Kharaa-Orkhon-Selenga River system // Geography, environment, sustainability. – 2014. – Vol. 7. Iss. 3. – P. 65-86.

108. Karthe, D., Chalov, S., Moreido, V., Efimov, V., Romanchenko, A., Batbayar, G., Kalugin, A., Westphal, K., Malsy, M. and Flörke, M. Assessment of Runoff, Water and Sediment Quality in the Selenga River basin Aided by a Web-Based Geoservice // Water Resour. – 2017. – Vol. 44, № 3. – P. 399–416.

109. Klemeš, V. Operational testing of hydrological simulation models // Hydrol. Sci. J. – 1986. – Vol. 31 – P. 13–24.

110. Knutti, R. The end of model democracy? An editorial comment // Climate Change. – 2010. – Vol. 102. – P. 395-404.

111. Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Germak, J., Meehl, G.A. Challenges in combining projections from Multiple Climate Models // J. Climate. – 2010. – Vol.23. – P. 2739-2758.

112. Korytny, L.M., Bazhenova, O.I., Martianova, G.N. and Ilyicheva, E.A. The influence of climatic change and human activity on erosion processes in sub-arid watersheds in southern East Siberia // Hydrol. Process. – 2003. – Vol. 7. – P. 3181–3193.

113. Krysanova V., Vetter T, Eisner S., Huang S, Pechlivanidis I., Strauch M., Gelfan A., Kumar R.,, Aich V., Arheimer B., Chamorro A., van Griensven A., Kundu D., Lobanova A., Mishra V., Plotner S., Reinhardt J., Seidou O., Wang X., Wortmann M., Zeng X., Hattermann F. Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide-a synthesis // Environ. Res. Lett. – 2017. – Vol. 12. № 10. – P. 105002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8359

114. Krysanova, V., Donnelly, C., Gelfan, A., Gerten, D., Arheimer, B., Hattermann, F., and Kundzewicz, Z.W., How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change // Hydrol. Sci. J. – 2018. – Vol. 63, P. 696–720. doi: 10.1080/02626667.2018.1446214

115. Lehner, B., Verdin, K., and Jarvis, A., New global hydrography derived from spaceborne elevation data // Eos Trans., 2008. – Vol. 89. № 10. – P. 93–94.

116. Loveland, T.R., Reed, B.C., Brown, J.F., Ohlen, D.O., Zhu, Z., Yang, L., and Merchant, J.W., Development of a global landcover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data // Int. J. Remote Sens. – 2000. – Vol. 21. – P. 1303–1330.

117. Ma, X., Yasunari, T., Ohata, T., Natsagdorj, L., Davaa, G., Oyunbaatar, D. Hydrological regime analysis of the Selenge River basin, Mongolia // Hydrol. Process. – 2003. – Vol. 17. № 14. – P. 2929 - 2945.

118. Malsy, M., Aus der Beek, T., Eisner, S., Kynast, E., Flörke, M. Vulnerability of Central Asian water resources to climate variability // Proc. IWA 1st Central Asian regional young and senior water professionals conf. Almaty, 2011. – P. 103–114.

119. Malsy, M., Aus der Beek, T., Eisner, S., Flörke, M. Climate change impacts on Central Asian water resources // Advances in Geosci. – 2012. – Vol. 32. – P. 77–83.

120. Malsy, M., aus der Beek, T., Flörke, M. Global change impacts on Mongolian water resources // Beiträge zum 44. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie / Eds. Chifflard P., Cyffka B., Karthe D., Wetzel K.F. Augsburg: Geographica Augustana, 2013. – P. 95–98.

121. Mannig, B., Muller, M., Starke, E., Merkenschlager, C., Mao, W., Zhi, X., Podzun, R., Jacob, D., Paet,h H. Dynamical downscaling of climate change in Central Asia // Glob Planet Chang. – 2013. Vol. – 110(A): – P. 26-39. doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.05.008

122. Map of the World distribution of arid regions. Explanatory note. Man and Biosphere MAB. Paris: UNESCO Press, 1979.

123. Menzel, L., Aus der Beek, T., Törnros, T., Wimmer, F., Gomboo, D. Hydrological impact of climate and landuse change – results from the MoMo project // Int. conf. “Uncertainties in water resource management: causes, technologies and consequences” / Eds. Basandorj B., Oyunbaatar D. Jakarta: IHP Tech. documents in hydrol., 2008. № 1. – P. 13-18.

124. Minderlein, S., Menzel, L. Evapotranspiration and energy balance dynamics of a semi-arid mountainous steppe and shrubland site in Northern Mongolia // Environ Earth Sci. – 2014. – Vol. 73 – P. 593–609.

125. Moriasi, D. N., Zeckoski, R. W., Arnold, J. G., Baffaut, C. B., Malone, R. W., Daggupati, P., Guzman, J. A., Saraswat, D., Yuan, Y., Wilson, B. W., Shirmohammadi, A., Douglas-Mankin, K. R.. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria, // Transactions of the ASABE. – 2015. – Vol.58. Issue 6. – P. 1609-1618.

126. Motovilov, Y., Gottschalk, L., Engeland, K., and Rodhe, A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations // Agric. For. Meteorol. – 1999. Vol. 98–99, P. 257–277. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00102-1

127. Murphy, A. H., Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient // Mon. Weather Rev. – 1988. – Vol. 116. – P. 2417–2424.

128. Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles // J. Hydrol. – 1970. – Vol. 10, – P. 282–290.

129. National Atlas of Mongolia, (Editor: Dorjgotov D.). The Institute of Geography of Mongolian Academy of Science, Ulaanbaatar, 2009.

130. Otgonsuren, S., Erdenesukh, S. To estimate streamflow: long-term prediction for Ongi River // Environment and sustainable development in Mongolian plateau and adjacent territories. Materials of the IX Int. Conf. Vol. 1. Ulan-Ude: BSU, 2013. – P. 45–48.

131. Peel, M.C., Blöschl, G. Hydrological modeling in a changing world // Prog. Phys. Geogr. – 2011. – Vol.35. – P. 249-261.

132. Refsgaard, J.C., Madsen, H., Andréassian, V., Arnbjerg-Nielsen, K., Davidson, T.A., Drews, M., Hamilton, D.P., Jeppesen, E., Kjellström, E., Olesen, J.E., Sonnenborg, T.O., Trolle, D., Willems, P., and Christensen, J.H., A framework for testing the ability of models to project climate change and its impacts // Clim. Change. – 2013. – Vol. 122. – P. 271–282.

133. Sankarasubramanian, A., Vogel, R.M., Limbrunner, J.F. Climate elasticity of streamflow in the United States // Water Resour. Res. – 2001. – Vol. 37 (6), – P. 1771–1781.

134. Sato T., Kimura F. Regional climate simulations to diagnose environmental changes in Mongolia // Bull Terr Environ Res Cent Univ.Tsukuba. –2006. – Vol. 7. – P. 59–69.

135. Sato T., Kimura F., Kitoh A. Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model // J. Hydrol. 2007. –Vol. 333. – P. 144–154.

136. Savvidou, E.; Efstratiadis, A.; Koussis, A.D.; Koukouvinos, A.; Skarlatos, D. The Curve Number Concept as a Driver for Delineating Hydrological Response Units // Water. – 2018. – Vol. 10, 194. https://doi.org/10.3390/w10020194

137. Saxton, K.E., Rawls, W.J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions // Soil Sci. Soc. Am. J. –2006. – Vol.70. – P. 1569-1578.

138. Schaefli, B, Hingray, B, Niggli, M, and Musy, A. A conceptual glaciohydrological model for high mountainous catchments // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2005. – Vol. 9. P. 95–109.

139. Seibert, J., On the need for benchmarks in hydrological modelling // Hydrol. Processes. – 2001, Vol. 15. – P. 1063–1064. doi: 10.1002/hyp.446

140. 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. – 2011. – Vol.15. – P. 3591- 3603.

141. Smith, L.C., Pavelsky, T.M., MacDonald, G.M., Shiklomanov, A.I., Lammers, R.B., Rising minimum daily flows in northern Eurasian rivers: a growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle // J. Geophys. Res. – 2007. – Vol. 112, G04S47.

142. Tang, Q., Leng, G. Damped summer warming accompanied with cloud cover increase over Eurasia from 1982 to 2009 // Environ. Res. Lett. – 2012. – No. 7. – 7 p.

143. Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., An Overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2012. – Vol. 93. – P. 485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

144. Theuring, P., Collins, A.L., Rode, M. Source identification of fine-grained suspended sediment in the Kharaa River basin, northern Mongolia // Sci. Total Environ. – 2015. – Vol. 526. – P. 77- 87.

145. Thirel, G., Andréassian V., and Perrin C., On the need to test hydrological models under changing conditions // Hydrol. Sci. J. – 2015a. – Vol. 60. – № 7-8. – P. 1165-1173. doi: 10.1080/02626667.2015.1050027

146. Thirel, G., Andréassian, V., Perrin, C., Audouy, J.-N., Berthet, L., Folton, N., , Furusho, C., Kuentz, A., Lerat, J., Lindström, G., Martin, E., Mathevet, T., Merz, R., Parajka, J., Ruelland, D., and Vaze, J., Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments // Hydrol. Sci. J. – 2015б. – Vol. 60. – № 7-8, P. 1184–1199. doi: 10.1080/02626667.2014.967248

147. Thorslund, J., Jarsjö, J., Chalov, S., Belozerova, E. Gold mining impact on riverine heavy metal transport in a sparsely monitored region: the upper Lake Baikal Basin case // Journal of Environmental Monitoring. – 2012. – Vol. 14. № 10. – P. 2780-2792.

148. Törnqvist, R., Jarsjo, J., Pietron, J., Bring, A., Rogberg, P., Asokan, S.M., and Destouni, G., Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin // J. Hydrol. – 2015. – Vol. 519. – P. 1953–1962.

149. Tornros, T., Menzel, L. Heading for knowledge in a data scarce river basin: Kharaa, Mongolia. In: Herrman A, Schumann S (eds) Status and perspectives of hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March- 2 April 2009) / IAHS Publ. – 2010. – Vol. 336, – P. 270–275.

150. Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Gafurov, A., Duethmann, D., Mandychev, A., Merz, B. What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review // Glob Planet Chang. – 2013. – Vol. 110 (A), – P. 4-25. doi: 10.1016/j.gloplacha.2013.02.004

151. van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N.,

Smith, S. J., Rose, S.K. The representative concentration pathways: an overview // Clim. Change. – 2011. – Vol. 109. – P.5–31.

152. Vano, J.A., Lettenmaier, D.P. A sensitivity-based approach to evaluating future changes in Colorado River discharge // Climatic Change. – 2014. – Vol. 122. – P.621-634.

153. Vehviläinen, B., Motovilov, Yu.G. Simulation of soil frost depth and effect on runoff // Hydrol. Res. WA Publishing, Nordic Hydrology. – 1989. – Vol. 20. – P. 9-24.

154. Weedon, G.P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W.J., Blyth, E., Osterle, H., Adam, J.C., Bellouin, N., Boucher, O., and Best, M., Creation of the watch forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century // J. Hydrometeorol. – 2011. – Vol. 12. №5. P. 823–848. doi:10.1175/2011JHM1369.1

155. Weigel, A., Knutti, R., Liniger, M., Appenzeller, C. Risks of model weighting in Multimodel Climate Projections // J. Climate. – 2010. – V.23 № 15. – P. 4175-4191.

156. Wöhling, T., Samaniego, L., and Kumar, R., Evaluating multiple performance criteria to calibrate the distributed hydrological model of the upper Neckar catchment // Environ. Earth Sci. – 2013. – Vol. 69. – P. 453–468. doi:10.1007/s12665-013-2306-2

157. Wooldridge, S.A., Kalma, J.D. Regional-scale hydrological modelling using multiple-parameter landscape zones and a quasi-distributed water balance model // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2001. – Vol. 5. № 1. P. 59–74.

158. World Meteorological Organisation. Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff, Operational Hydrology Report No. 23. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 1986.

159. Yates, D, Strzepek, K.M. Comparison of Models for Climate Change Assessment of Rive r Basin Runoff. IIASA Working Paper. – Laxenburg, Austria: WP94045. 1994. – 53 p.

160. Yilmaz, K.K., Gupta, H.V., and Wagener, T., A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model // Water Resour. Res., 2008. – Vol. 44. W09417. doi: 10.1029/2007WR006716

161. Yoshikawa, K., Hinzman, L.D. Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost near Council, Alaska // Permafrost Periglac Process. – 2003. Vol. 14. № 2. – P. 151–160.

162. Zhao L., Wu Q., Marchenko S.S., Sharkhuu N. Thermal state of permafrost and active layer in central Asia during the international polar year // Permafrost Periglac Process. 2010. – Vol. 21. № 2. – P. 198–207.

Приложение А.

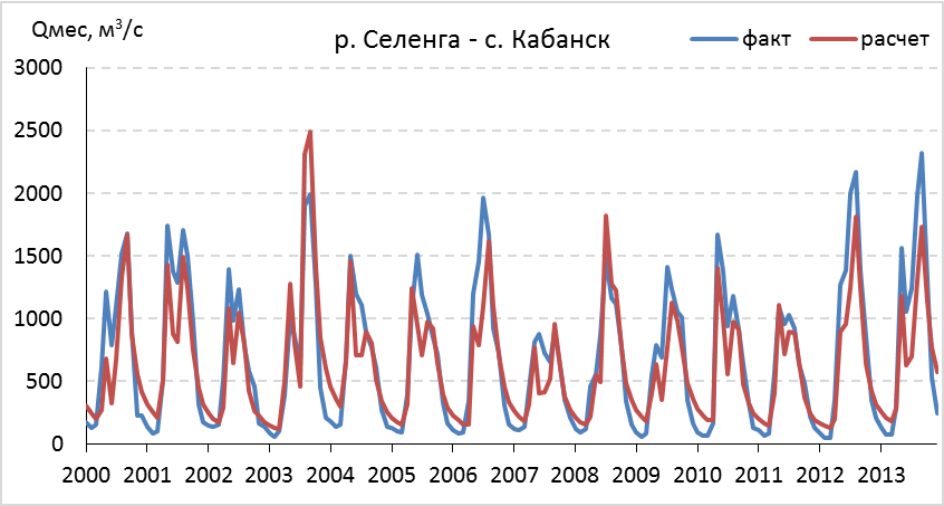

Рисунок А.1 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений месячные гидрографы р. Селенги в створе с. Кабанск за период калибровки

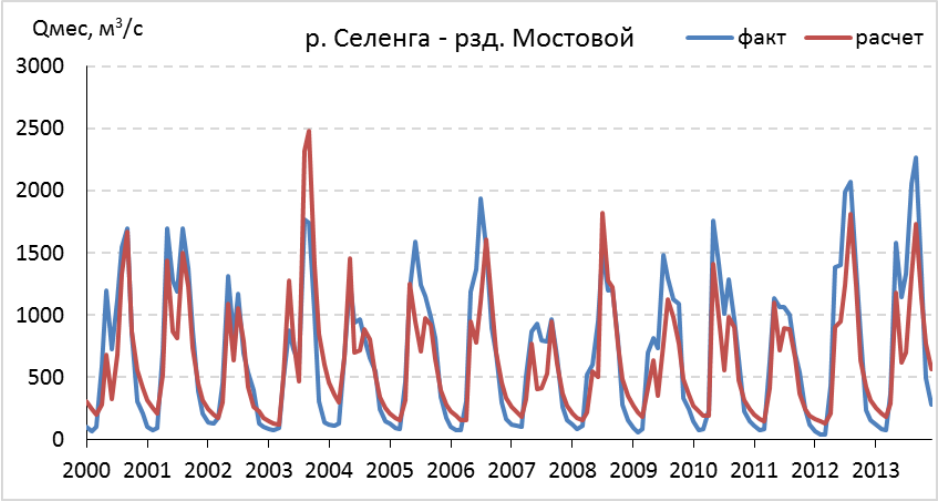

Рисунок А.2 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений месячные гидрографы р. Селенги в створе рзд. Мостовой за период калибровки

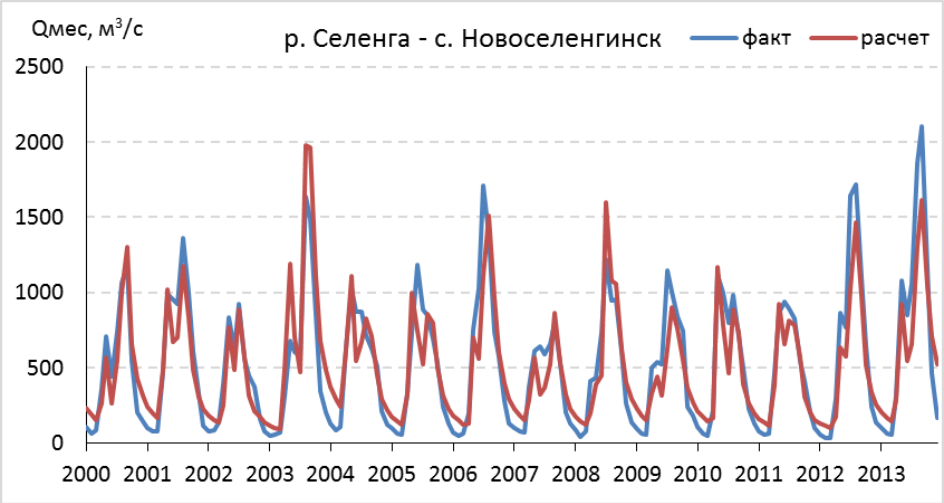

Рисунок А.3 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений месячные гидрографы р. Селенги в створе с. Новоселенгинск за период калибровки

Рисунок А.4 Фактические и рассчитанные по данным метеорологических наблюдений месячные гидрографы р. Селенги в створе с. Зуунбурен за период калибровки

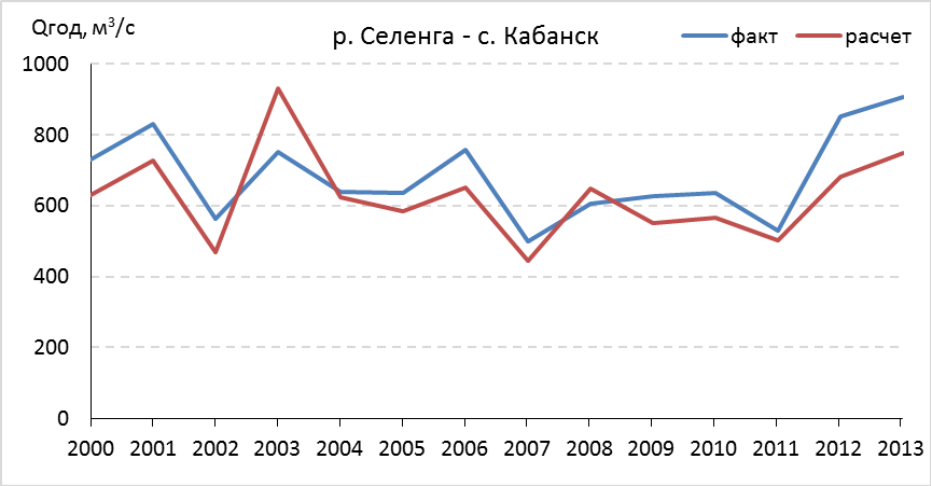

Рисунок А.5 Изменения фактических (синяя линия) и рассчитанных (красная линия) по данным метеорологических наблюдений величин годового стока р. Селенги в створе с. Кабанск за период калибровки

Рисунок А.6 Изменения фактических (синяя линия) и рассчитанных (красная линия) по данным метеорологических наблюдений величин годового стока р. Селенги в створе рзд. Мостовой за период калибровки

Рисунок А.7 Изменения фактических (синяя линия) и рассчитанных (красная линия) по данным метеорологических наблюдений величин годового стока р. Селенги в створе с. Новоселенгинск за период калибровки

Рисунок А.8 Изменения фактических (синяя линия) и рассчитанных (красная линия) по данным метеорологических наблюдений величин годового стока р. Селенги в створе с. Зуунбурен за период калибровки

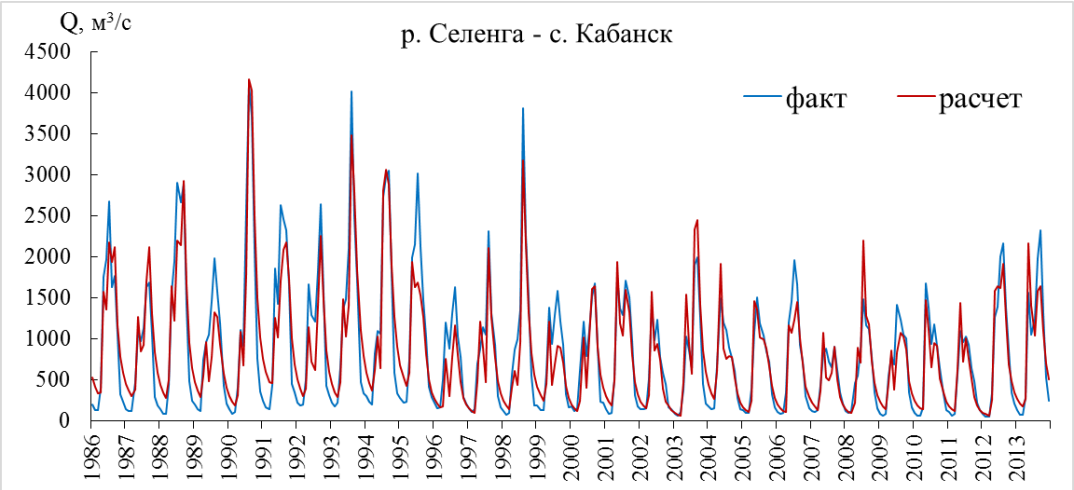

Рисунок А.9 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа месячные гидрографы р. Селенги в створе с. Кабанск

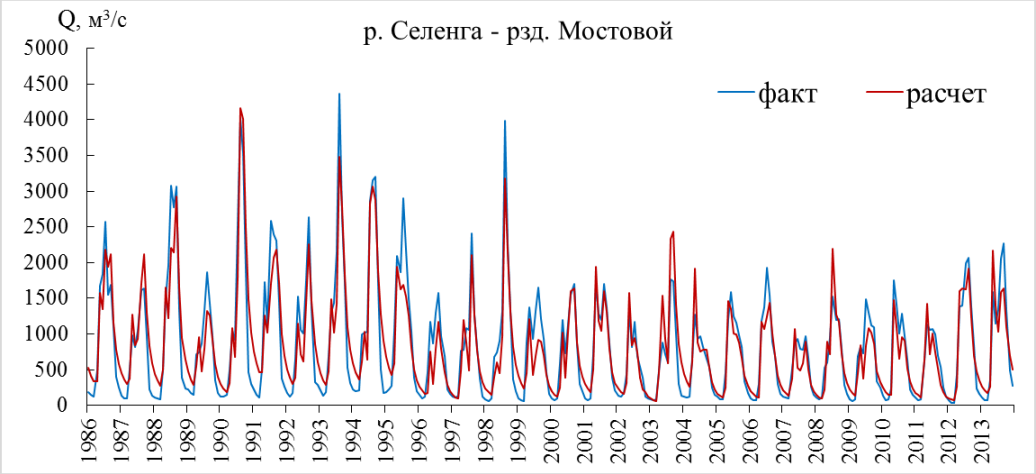

Рисунок А.10 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа месячные гидрографы р. Селенги в створе рзд. Мостовой

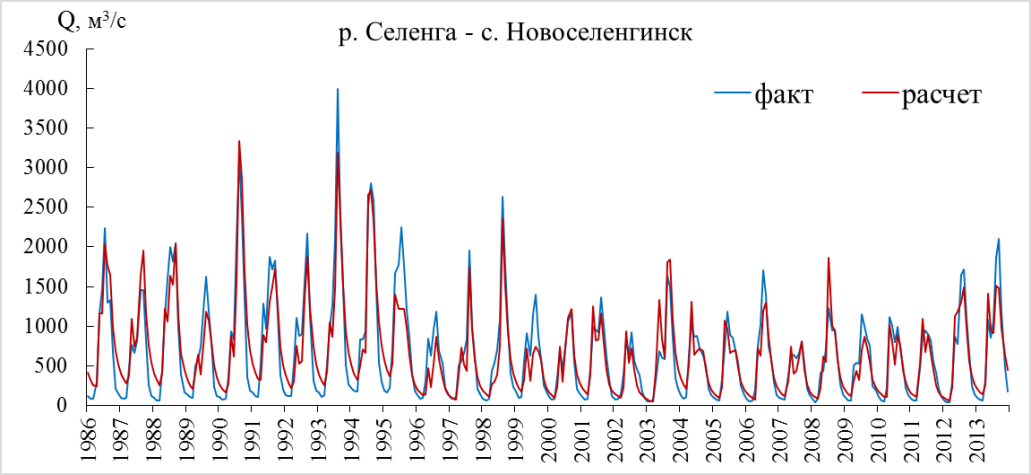

Рисунок А.11 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа месячные гидрографы р. Селенги в створе с. Новоселенгинск

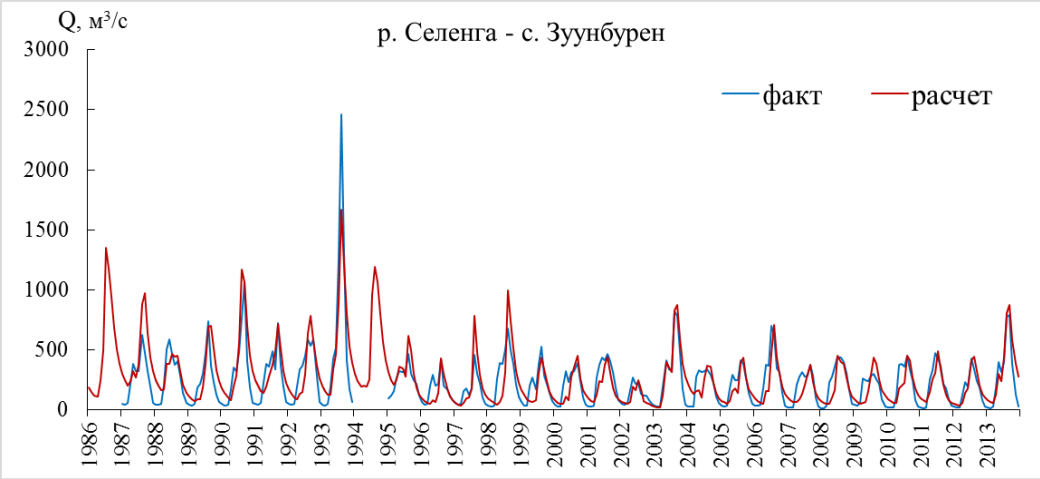

Рисунок А.12 Фактические и рассчитанные по данным метеорологического реанализа месячные гидрографы р. Селенги в створе с. Зуунбурен

Приложение Б.

Вывод формулы для оценки выборочной дисперсии критерия Нэша-Сатклиффа

В работе [Murphy, 1988] получена формула декомпозиции критерия Нэша-Сатклиффа *NSE*:

$$NSE = A - B - C, \tag{Б.1}$$

Где $A = \rho^2$, $B = [\rho - (\sigma_s / \sigma_f)]^2$, $C = [(\mu_s - \mu_f) / \sigma_f]^2$

где, σ_s и σ_f – среднеквадратическая ошибка ряда смоделированных и фактических расходов, соответственно; ρ - коэффициент корреляции Пирсона между смоделированным и фактическим расходами; μ_s и μ_f - математическое ожидание ряда смоделированных и фактических расходов, соответственно.

В работе [Gupta et al., 2009] декомпозиция указанного критерия представлена в виде:

$$NSE = 2\alpha\rho - \alpha^2 - \beta^2, \tag{Б. 2}$$

где $\alpha = \dfrac{\sigma_s}{\sigma_f}$, $\beta = \dfrac{\mu_s - \mu_f}{\sigma_f}$.

Критерий *NSE*, представленный выражением (Б.2) - есть функция $NSE = f(\sigma_f, \sigma_s, \mu_s, \mu_f, \rho)$ случайных величин - выборочных оценок стандартного отклонения, математического ожидания и коэффициента корреляции Пирсона. После разложения этой функции в ряд Тейлора в окрестности математического ожидания, ограничиваясь членами разложения 1-го порядка и определяя дисперсии обеих частей полученного выражения, получаем выражение для выборочной дисперсии критерия Нэша-Сатклиффа *NSE* в виде:

$$\sigma_{NSE}^2 = (2\rho - 2\alpha)^2 \sigma_\alpha^2 + 4\alpha^2 \sigma_\rho^2 + 4\beta^2 \sigma_\beta^2, \tag{Б. 3}$$

Используя так же линеаризацию функций $\alpha = \dfrac{\sigma_s}{\sigma_f}$, $\beta = \dfrac{\mu_s - \mu_f}{\sigma_f}$, получаем выражения для среднеквадратических отклонений σ_α^2, σ_β^2:

$$\sigma_\alpha^2 = \left(\frac{1}{\sigma_f}\right)^2 \sigma_{\alpha_s}^2 + \left(-\frac{\sigma_s}{\sigma_f^2}\right)^2 \sigma_{\alpha_f}^2, \tag{Б. 4}$$

$$\sigma_\beta^2 = \left(\frac{1}{\sigma_f}\right)^2 \sigma_{\mu_s}^2 + \left(-\frac{\sigma_s}{\sigma_f^2}\right)^2 \sigma_{\mu_f}^2 + \left(-\frac{(\mu_s - \mu_f)}{\sigma_f^2}\right)^2 \sigma_{\sigma_f}^2, \tag{Б. 5}$$

Если предположить, что выборочные оценки среднего, стандартного отклонения, а также коэффициента корреляции, распределены по нормальному закону, то выборочные дисперсии соответствующих оценок, входящих в выражения (Б.3)-(Б.5), равны:

$$\sigma_{\sigma}^{2} = \frac{\sigma^{2}}{2N}, \tag{Б.6}$$

$$\sigma_{\mu}^{2} = \frac{\sigma^{2}}{N}, \tag{Б.7}$$

$$\sigma_{\rho}^{2} = \frac{1-\rho^{2}}{N-2}, \tag{Б.8}$$

где N – длина выборки, по которой производятся оценки соответствующих статистик.

Подставив (Б.6)-(Б.7) в (Б.4)-(Б.5), получаем:

$$\sigma_{\alpha}^{2} = \left(\frac{1}{\sigma_{f}}\right)^{2} \frac{\sigma_{s}^{2}}{2N} + \left(-\frac{\sigma_{s}}{\sigma_{f}^{2}}\right)^{2} \frac{\sigma_{f}^{2}}{2N} = \frac{\alpha^{2}}{2N} + \frac{\alpha^{2}}{2N} = \frac{\alpha^{2}}{N}, \tag{Б. 9}$$

$$\sigma_{\beta}^{2} = \left(\frac{1}{\sigma_{f}}\right)^{2} \frac{\sigma_{s}^{2}}{N} + \frac{1}{\sigma_{f}^{2}} \frac{\sigma_{f}^{2}}{N} + \frac{\left(\mu_{s}-\mu_{f}\right)^{2}}{\sigma_{f}^{4}} \frac{\sigma_{f}^{2}}{2N} = \frac{\alpha^{2}}{N} + \frac{1}{N} + \frac{\beta^{2}}{2N}, \tag{Б. 10}$$

Подставляя полученные выражения (Б.9)-(Б.10), а также (Б.8) в (Б.3), получаем окончательную формулу для оценки выборочной дисперсии критерия Нэша-Сатклиффа *NSE* :

$$\sigma_{\mathrm{NSE}}^{2} = \frac{4}{N}\left[\left(\rho-\alpha\right)^{2}\alpha^{2} + N\alpha^{2}\left(\frac{1-\rho^{2}}{N-2}\right) + \beta^{2}\left(\alpha^{2}+\beta^{2}+1\right)\right]. \tag{Б.11}$$