

Санкт-Петербургский государственный университет

ФЕДОРОВА Александра Дмитриевна

Выпускная квалификационная работа

***Влияние изменения климата на характеристики стока рек Восточного Саяна на
примере реки Ии***

Уровень образования: магистратура
Направление 05.04.04 «Гидрометеорология»
Основная образовательная программа ВМ.5745.2019 «Опасные гидрологические явления: от
мониторинга до принятия решений (ГОЯ)»

Научный руководитель: доцент кафедры
гидрологии суши СПбГУ, к.т.н.,
Макарьева Ольга Михайловна

Рецензент: доцент кафедры картографии
и геоинформатики ПГНИУ, к.г.н.,
Шихов Андрей Николаевич

Санкт-Петербург

2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	7
2. ГИДРОЛОГО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ.....	11
2.1. Общие сведения	11
2.2. Рельеф. Геологическое строение.....	13
2.3. Климат.....	14
2.4. Почвы	15
2.5. Растительный покров.....	15
3. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАССИВЫ ДАННЫХ.....	16
4. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ	18
4.1. Описание методики (модели)	18
4.2. Верификация гидрологической модели.....	19
5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПАВОДКА В ИЮНЕ 2019 ГОДА.....	25
5.1. Данные	25
5.2. Моделирование паводка в июне 2019 года	27
6. АНАЛИЗ ДАННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.....	29
5.1. Предварительная подготовка.....	29
5.2. Методы.....	30
5.3. Результаты	34
5.3.1. Сравнение кривых вероятности превышения климатических характеристик для исторического периода 1970-2005	34
5.3.2. Сравнение трендов климатических характеристик для исторического периода 1970- 2005	40
5.3.3. Выявление трендов климатических характеристик по данным климатических проекций на будущий период 2006-2098 согласно двум сценариям развития выбросов парниковых газов.....	45

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	58
ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	61
ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ.....	62
Монографии:	62
Статьи в журналах:	62
Фондовые материалы:	66
Ресурсы сети Интернет:	67

ВВЕДЕНИЕ

Иркутская область является одним из наиболее паводкоопасных регионов России. В зонах возможного затопления в Иркутской области расположены около 222 населенных пункта, в том числе восемь городов (Тулун, Киренск, Нижнеудинск, Иркутск, Усть-Кут, Черемхово, Зима, Ангарск). Площадь периодически затапливаемых пойменных земель превышает 25 000 км², что составляет около 4% от общей площади региона (Кичигина, 2018).

На территории Иркутской области наводнения могут возникать вследствие половодья и дождевых паводков, а также заторов и зажоров. Часто наводнения имеют смешанный генезис — на половодье накладываются дожди или заторы, а дождевые паводки в некоторые годы усугубляются селями. Наиболее опасными являются наводнения в южных районах Иркутской области, вызванные дождевыми паводками. Они имеют наибольшую повторяемость, площади затопления, наносят значительный экономический ущерб и приводят к гибели людей. Прогнозируемость таких наводнений, определяемая степенью успешности прогнозов осадков, остается достаточно низкой.

Ранее крупные наводнения в южной части Иркутской области наблюдались в 1984, 1996, 2001 и затем в 2019 гг., наиболее разрушительным из них было наводнение в июле 2001 г. (Кичигина, 2018), а исторический максимальный расход – в 1984 году, а затем и в 2019 году. Несмотря на высокую повторяемость разрушительных паводков, в Атласе природных и техногенных опасностей и рисков, юг Иркутской области отнесен к зоне умеренно опасных наводнений.

Летом 2019 года на реках Иркутской области, стекающих с гор Восточного Саяна (Ия, Уда, Бирюса и Ока) прошли две волны экстремальных дождевых паводков, ставших самыми разрушительными в регионе за всю историю наблюдений.

Наибольший подъем уровня воды был зафиксирован на посту р. Ия – г. Тулун (с 474 до 1387 см за трое суток) в период первого паводка, 26 июня – 5 июля 2019 г. Зафиксированный уровень воды более чем на 5 м превысил опасную отметку 850 см и на более чем 2,5 м – исторический максимум 1133 см, отмечавшийся в 1984 г. Паводок привел к катастрофическому затоплению г. Тулун и других населенных пунктов, расположенных

в пойме р. Ия. Всего при наводнении пострадали 107 населенных пунктов, погибли 25 человек и 8 пропали без вести¹.

В период 28 июля – 4 августа 2019 г. на р. Ия произошел еще один значительный паводок (максимальный уровень воды достиг отметки 1121 см). Он по масштабу сопоставим с паводком 1984 года, до 2019 года считавшимся максимальным.

Основной причиной формирования катастрофического паводка являются продолжительные интенсивные дожди (Макарьева и др., 2020). Сотрудники Гидрометцентра охарактеризовали данное явление как развитие аномальных атмосферных процессов, проявляющихся на фоне наблюдаемых глобальных и региональных изменений климата².

В последнее десятилетие все чаще фиксируются катастрофические паводки в разных частях страны и мира, многие из которых исследователи связывают с климатическими изменениями (Meredith et al., 2015; Kundzewicz et al., 2014; Shiklomanov et al., 2007). В прогнозе долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года изменения климата указаны в качестве одного из основных внешних вызовов. Основным способом оценки климатических изменений является разработка глобальных климатических моделей и проекций на будущий период и анализ этих данных.

В связи с этим **целью** данной работы является оценка возможных изменений гидрологического цикла в бассейне реки Ия (Иркутская область) на основе данных климатических проекций в условиях современного и будущего климата в 21 веке в результате антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему в соответствии со сценариями выбросов парниковых газов и аэрозолей, разработанными Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Изучить объект исследования, понять специфику опасных гидрологических явлений, наблюдаемых в рассматриваемой области;
- 2) Выполнить параметризацию гидрологической модели «Гидрограф» и ее верификацию на основе исторических данных наблюдений;
- 3) Рассчитать катастрофический паводок 2019 года на основе данных метеорологической модели и гидрологической модели Гидрограф;

¹ <https://ria.ru/20190721/1556733218.html>

² https://www.gazeta.ru/science/2019/07/02_a_12471205.shtml

4) Выбрать региональные модели климата, освоить технические методы обработки данных климатических моделей, провести сравнительный анализ на адекватность воспроизведения метеорологических условий формирования стока, выполнить их оптимизацию для использования в качестве входных данных гидрологической модели;

5) Представить прогноз трансформации гидрологического цикла, его компонент и характеристик стока, в том числе, максимального на период до 2100 г. на основе данных климатических проекций и математического моделирования гидрологических процессов;

6) Оценить полученные результаты и сделать выводы.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью заблаговременной адаптации всех сфер жизнедеятельности человека к последствиям изменения климата на основе исследования, моделирования и прогноза поведения природных систем и их экстремальных состояний в будущем в целях планирования хозяйственной деятельности и обеспечения безопасности населения.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В настоящее время наблюдается изменение климата, проявляющееся в глобальном потеплении (IPCC, 2007). Увеличение концентрации парниковых газов (как антропогенного, так и естественного происхождения) изменяет радиационный баланс в стратосфере, вызывая повышение температуры, что в свою очередь вызывает изменение и других климатических характеристик (Houghton et al., 1990).

Согласно (Dai, 2016) в период с 1950 по 2012 год осадки и сток увеличились в южной части Америки, центральной и северной Австралии, центральной и северной Европе и большей части России. Также в данной работе сделаны выводы о том, что тенденции стока в основном не являются статистически значимыми, но они согласуются с наблюдаемыми региональными изменениями осадков.

Наблюдаемые изменения в стоке и осадках связаны с крупномасштабной циркуляцией системы океан-атмосфера, однако влияние антропогенных парниковых газов и аэрозолей также имеет важное значение (Gudmundsson et al., 2017; Chiew et al., 2013). Изменения гидрологических экстремальных явлений, как ожидается, должны быть более выраженными и могут быть связаны с изменением климатических условий (IPCC, 2014). Принято считать, что происходящее изменение климата приводит к увеличению речного стока (увеличению расхода воды) и продолжительности наводнений. Однако гидрологические процессы в различных физико-географических зонах по-разному реагируют на изменение климата: где-то это действительно вызывает интенсификацию катастрофических наводнений, а где-то, наоборот, сток снижается вплоть до полного его отсутствия, что приводит к засухам (Mujere and Eslamian, 2014).

Экстремальные осадки связаны с большими негативными последствиями для общества, главным образом потому, что они вызывают наводнения и другие опасные гидрологические явления. В рамках опасных гидрологических явлений наибольший интерес представляет максимальный сток и возможные его изменения в условиях изменяющегося климата. В последние годы количество и величина паводков на территории России возросли, наиболее значительными среди них оказались события 2002, 2010, 2012-2015, 2019 гг. (Воробьев и др., 2003; Панов и др., 2012; Колтерманн и др., 2012). Все наводнения, приведшие к значительному ущербу и потерям человеческих жизней, были вызваны экстремальными осадками, сумма и интенсивность которых не наблюдались ранее.

Многочисленные исследования, посвященные изучению изменения экстремального стока, показали, что, действительно, в рамках периода их анализа в различных частях земного шара наблюдается увеличение именно экстремального стока (Do et al., 2017; Stevens et al. 2016). В (IPCC, 2014) сделан вывод о том, что тенденции изменения суммарного годового стока не являются статистически значимыми, в то время как частота наводнений и экстремальный сток увеличились в некоторых регионах. В некоторых исследованиях есть указания на изменение сезонности стока рек с увеличением паводков зимой и осенью и уменьшением весной, например в Финляндии (Veijalainen et al., 2010) и Норвегии (Vormoor et al., 2015).

В последнее время значительное внимание уделяется климату России как части глобальной климатической системы, появляются работы, посвященные оценке изменения стока рек, в том числе и максимального, на основе данных климатических моделей. Однако для территории Российской Федерации такие исследования направлены преимущественно для территории, расположенной в районах многолетней мерзлоты, например (Shiklomanov et al., 2017; Shiklomanov et al., 2007; Shkolnik et al., 2017; Shiklomanov et al. 2016).

Наиболее часто используемым инструментом для моделирования климатических условий, а также для экспериментов по изменению климата в глобальном масштабе являются глобальные климатические модели (Global Climate Model, далее GCMs). Это связано с тем, что современные климатические модели прогнозируют усиление глобального потепления, связанного с увеличением концентраций парниковых газов в атмосфере (IPCC, 2007; IPCC, 2014). Для изучения влияния изменений климата на региональном уровне, применение глобальных климатических моделей с разрешением 100 – 250 км неприемлемо, потому что отсутствует детализация региональной информации, которая необходима для условий масштаба речных бассейнов (Fowler et al., 2007a; Salathé, 2003). Региональные климатические модели высокого разрешения (Regional Climate Model, далее RCMs) используются для получения прогнозов климата на региональном уровне (Fowler et al. 2007b; Christensen et al. 2008).

Чувствительность региональных гидрологических процессов под влиянием изменяющегося климата делает прогнозы изменения климата важными для оценки будущих изменений в гидрологическом цикле. Региональные модели передают крупномасштабную информацию из глобальных моделей в масштаб 25 – 50 км, которые ближе к масштабу водосбора. Хотя региональные модели способны моделировать гидрологические компоненты, такие как поверхностные и подземный сток в дополнение к другим климатическим параметрам, результаты такого моделирования редко согласуются

с наблюдаемыми данными (Teutschbein and Seibert, 2010), и поэтому напрямую не используются для оценки гидрологического воздействия в масштабе речных бассейнов (Bergström et al., 2001). Вместо этого результаты регионального моделирования климатических переменных, таких как температура и осадки, используются в качестве входных данных в гидрологические модели при моделировании речного стока.

В мировой практике широко распространено использование ансамблевого подхода, поскольку к данным моделирования температуры и осадков стоит относиться с осторожностью т.к. они несут в себе большую долю неопределенности (Giorgi, 2006; Teutschbein and Seibert, 2010). Причины неопределенности модельных данных включают систематические ошибки модели, вызванные несовершенной концептуализацией, дискретизацией и пространственным усреднением в ячейках сетки, что затрудняет прямое использование данных региональных климатических моделей для гидрологических исследований. К типичным ошибкам моделей относятся как большое количество дождливых дней с дождем низкой интенсивности или неверная оценка экстремальных температур, так и общая недооценка или переоценка и неправильные сезонные колебания осадков (Christensen et al., 2008; Teutschbein and Seibert, 2010).

Стоит отметить, что не каждая региональная модель способна адекватно описывать региональные изменения в рассматриваемой области. В работе (Кокорев и Анисимов, 2013) приводится обоснование важности тестирования моделей на региональном уровне, для чего необходимо сравнение с наблюдаемыми характеристиками расчетных параметров, которые являются наиболее важными для климатозависимых процессов в конкретном регионе.

В данном исследовании из-за технической невозможности использования большого числа климатических моделей для применения ансамблевого метода предложен подход, заключающийся в расчете и сравнении климатических характеристик по данным климатических моделей на исторический период с данными наблюдений на метеорологических станциях.

Необходимо принимать во внимание, что из-за большой неопределенности климатических прогнозов невозможно разработать научно обоснованную процедуру для определения расчетных паводков с целью защиты от наводнений (Kundzewicz et al., 2010). В работе (Shiklomanov et al., 2007) делается заявление о том, что лучшее понимание гидрологических изменений, связанных с изменением климата, может быть достигнуто путем изучения небольших речных бассейнов, а исследование физических процессов лучше всего определять с помощью ежедневных данных.

Стоит отметить, что прогноз опасных гидрологических явлений возможен и без применения климатических моделей, однако в наблюдающейся в настоящее время тенденции сокращения гидрологической сети в Российской Федерации зачастую это не представляется возможным. К тому же ретроспективные данные наблюдений могут носить недостоверный характер, особенно в условиях изменяющегося климата. Такая ситуация ранее была рассмотрена группой ученых в работах (Макарьева и др. 2019а; Макарьева и др. 2019б). Слабая изученность механизмов, приводящих к наблюдаемым изменениям гидрологического цикла в условиях изменения климата и усиления антропогенного воздействия, а также крайняя ограниченность данных наблюдений приводит к тому, что использование стандартных методов расчета характеристик стока, основанных на статистическом анализе рядов гидрологических данных, не всегда является обоснованным.

В качестве объекта исследования выбран водосбор реки Ия (Иркутская область). Такой выбор обусловлен резонансом, вызванным в обществе впоследствии произошедшего в 2019³ году паводкового наводнения, повлекшего за собой большие материальные потери и унесшего множество человеческих жизней. Основной причиной этого катастрофического явления стало выпадения экстремального количества осадков. Ранее крупные наводнения на реке Ия наблюдались в 1984, 1996, 2001 гг. Однако событие 2019 года стало максимальным историческим. *В связи с чем возникает вопрос, действительно ли в данном районе выпадение экстремальных осадков и вызванный ими катастрофический паводок связаны с климатическими изменениями, проявляющимися в интенсификации количества и величины осадков, и возможно ли, используя климатические модели и проекции, предсказать рост или уменьшение количества и величины катастрофических явлений в будущем.*

³ <https://ria.ru/20200625/1573362527.html>

2. ГИДРОЛОГО-ГИДРОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

2.1. Общие сведения

В качестве объекта исследования выбран бассейн реки Ия, расположенный в Иркутской области. В излучине реки Ии расположен город Тулун, являющийся крупным перевалочным транспортным узлом – через него проходит Транссибирская магистраль. Поселение на месте современного города появилось по предварительным оценкам в начале 18 века. Первые упоминания о наводнениях встречаются в начале 20 века – 1937 год, 29 июля 1980 (9 м 74 см), 18-20 июля 1984 (11 м 33 см), июнь 2006, 26-29 июня 2019 (почти 14 метров). Основные катастрофические наводнения наблюдаются в весенне-летний период. По генезису наводнения можно разделить на два типа: 1) наводнения в период половодья, 2) дождевые паводки.

Река Ия берет начало на северных склонах Восточного Саяна при слиянии рек Холбы и Хиаи на высоте до 2789 м над уровнем моря (гора Холба), является левым притоком реки Оки⁴ (Рис. 1). На юге территория бассейна ограничена Окским хребтом, на северо-западе – Бирюсинским хребтом, на юго-западе водораздельная линия проходит по Удинскому хребту. Длина реки 486 км, площадь бассейна 18100 км². Наиболее крупные притоки – Кирей, Икей, Курзанка.

В бассейне р. Ия в настоящее время действуют три гидрологических поста, на которых проводятся измерения расходов воды. Их характеристики приведены в Таблице 1. Гидрологический пост р. Ия – г. Тулун расположен в 4 км ниже г. Тулуна, в 1,2 км ниже железнодорожного моста. Площадь водосбора составляет 14500 км². Наблюдения за стоком ведутся с 1921 года, а непрерывные данные по максимальным уровням и расходам воды опубликованы с 1936 года.

Основная доля стока формируется в горной части водосбора, так на 8090 км² (56% площади водосбора) приходится около 280 мм стока, а на оставшуюся равнинную часть около 50 мм в год, что в сумме составляет 330 мм в створе гидрологического поста в г. Тулун.

⁴ <https://water-rf.ru>

Таблица 1. Характеристики гидрологических постов.

Код поста	8230	8233	8241
Река-створ	Ия – пос. Аршан	Ия – г. Тулун	Кирей – с. Уйгат
Площадь, км²	5140	14500	2950
Высота водосбора мак/мин/ср, м	2781/570/1483	2781/436/979	2485/485/873
Максимальный расход воды (срочный/суточный), м³/с (до 2019 года)	2810/1920	4400/4040	1210/931
Дата максимального расхода (до 2019 года)	20.07.1984	23.07.1984	21.07.1984
Слой стока (средний)	534	331	443
Период наблюдений за расходами воды	1963-н.в.	1941- н.в.	1959- н.в.

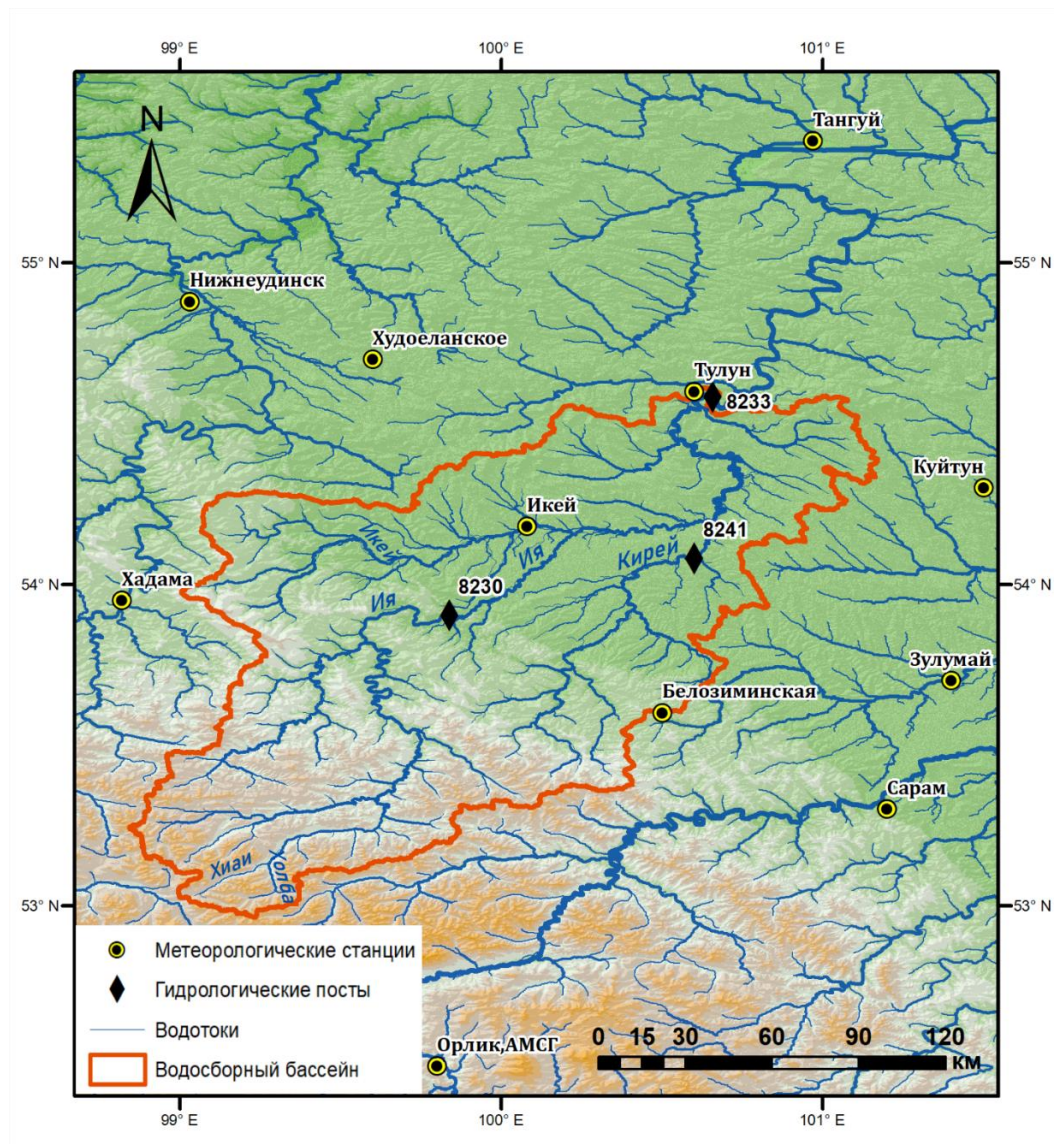


Рисунок 1. Объект исследования.

2.2. Рельеф. Геологическое строение

В орографическом отношении территория бассейна делится на две примерно равные части: горную (от истока до Передового хребта) и равнинную. Рельеф даже в пределах небольшого бассейна реки Ии весьма разнообразен: в нижней части это плоская аллювиальная равнина, в верхней – горная страна с крутосклонными долинами и узкими водораздельными гребнями. Несмотря на хорошо развитые карстовые явления на окружающей территории, в бассейне реки Ии наблюдаются слабые проявления карста. Рассматриваемый объект расположен в зоне высокобальной сейсмичности, вследствие чего наблюдаются обвалы. А из-за интенсивного морозного выветривания горных пород очень быстро идет их разрушение, происходит подготовка нового материала для осыпей, обвалов, селевых паводков.

2.3. Климат

Климат территории резко континентальный, характеризуется продолжительной умеренно холодной зимой. Значительное удаление от морей и океанов обуславливает отсутствие влияния теплых воздушных масс. Над территорией в зимний период господствует Азиатский (Сибирский) антициклон – область повышенного атмосферного давления, вследствие влияния которого наблюдается продолжительная малоснежная зима. В отличие от соседствующих территорий, климат бассейна более влажный. Среднегодовая температура воздуха составляет $-2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура января – $-21.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, июля – $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В зимний период происходят инверсии температур – со второй половине ноября, когда в приземном слое происходит резкое понижение температуры воздуха, в апреле зимние инверсии разрушаются. Градиенты температуры зимой достигают от $-0,8$ до $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. В горной части бассейна летний сезон (переход среднесуточной температуры воздуха через $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) запаздывает на 5 дней на каждые 100 м высоты и на высотах более 2000 м лето наступает лишь в конце первой декады июля. Летом градиент температур составляет от $0,2$ до $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$.

Годовое количество осадков изменяется в зависимости от высоты местности. На наиболее высоко расположенной метеорологической станции Белозиминская (755 м) среднегодовое количество осадков составляет около 800 мм. А на метеорологических станциях Икей (527 м) и Тулун (522 м), расположенных на равнинной части – около 450 мм. Основная часть осадков (до 85%) выпадает в теплый период. Максимальная интенсивность дождей, превышающая 2 мм/мин, чаще всего наблюдается на равнинных участках и значительно реже в горах (Ресурсы..., 1972).

Общее количество твердых осадков, выпадающих за холодный период, составляет 25-40 % годовой суммы. Длительная безоттепельная зима способствует практически полному сохранению твердых осадков. Снежный покров образуется в середине октября и разрушается в апреле.

Грунт промерзает до глубины 2,5 м. Снежный покров ложится на уже промерзший грунт до 1 м. Продолжительность вегетационного периода в среднем составляет 113 дней, а длительность безморозного периода колеблется от 73 до 97 дней⁵.

⁵ <http://tulunr.irkobl.ru/about/index.php>

2.4. Почвы

Почвы рассматриваемого бассейна и всей прилегающей территории в целом отличаются пестротой и разнообразием вследствие их формирования под воздействием разнообразных подстилающих пород и резко континентального климата. Общим в составе всех типов почв является насыщение их карбонатными и легкорастворимыми солями.

Горно-тундровые скалы с каменистыми россыпями, гольцово-дерновые, горно-лесные перегнойные, мерзлотно-болотные. На равнинной части наибольшее распространение имеют серые лесные, дерново-лесные, дерново-подзолистые. В среднем течении распространены преимущественно глинистые и тяжелосуглинистые почвы. По долине реки пятнами встречаются мерзлотно-болотные почвы.

Почвы Восточного Саяна подчиняются закону высотной поясности и распространены только до 1500-1700 м. Выше почвенный покров отсутствует. На отметках от 900 до 1600 м распространены гольцово-дерновые почвы. От 600 до 900 м распространены горно-лесные и мерзлотно-болотные почвы.

2.5. Растительный покров

Лесистость бассейна, как и других близрасположенных бассейнов, составляет 50-60 %. Нижняя часть бассейна относится к лесостепной зоне, верхняя представляет горно-таежный высокогорный комплекс. В лесостепной части преобладает сосна, лиственница встречается в виде примеси. В высокогорном поясе выше 1400 м господствует лишайниковая горная тундра.

3. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАССИВЫ ДАННЫХ

Данные наблюдений представлены наборами, полученными от ВНИИГМИ-МЦД⁶ для семи метеорологических станций (таблица 2). Состав данных включает данные наблюдений по трем характеристикам – температура и влажность воздуха, атмосферные осадки. Временное разрешение – 1 сутки. Предварительно проведено формирование однородных рядов инструментальных наблюдений в среде программирования MatLab.

Таблица 2. Характеристики метеорологических станций

Индекс	Название	Широта, град	Долгота, град	Высота, м	Среднегодовая сумма осадков, мм	Период
30504	Тулун	100.50	54.59	522	418	1936 - 2019
30507	Икей	100.08	54.18	527	472	1966 - 2012
30604	Белозиминская	100.60	53.57	755	758	1966 - 1997
30605	Сарам	95.83	58.55	500	559	1966 - 2012
30505	Куйтун	101.5	54.3	600	350	1970 - 2012
29894	Алыгджер	98.22	53.63	918	557	1966 - 2012
29793	Худоеланское	99.63	54.72	584	455	1966 - 1987
29892	Хадама	98.82	53.95	704	544	1966 - 2012

В пределах бассейна р. Ии в настоящее время действуют две метеостанции — Икей и Тулун – обе расположены в равнинной части водосбора. До 1999 г. поблизости от восточной границы водосбора действовала м/с Белозиминская (высота 755 м), на которой годовое количество в 1,6–1,8 раза превышало количество осадков на ныне действующих станциях (таблица 2). Таким образом, по основной стокоформирующей части водосбора уже более 20 лет отсутствуют данные наблюдений за осадками и другими метеорологическими величинами.

Данные климатических моделей представлены наборами климатических проекций для двух сценариев эмиссии парниковых газов RCP 8,5 и RCP 2,6 с граничными условиями от трех глобальных климатических моделей (МОHC-HadGEM2-ES, MPI-M-MPI-ESM-LR, NCC-NorESM1-M) в общем домене ансамбля EURO-CORDEX⁷ (Coordinated Regional Downscaling Experiment) из CMIP5 (Taylor et al., 2012), которые были динамически

⁶ <http://meteo.ru/>

⁷ <https://cordex.org>

уменьшены региональной моделью REMO2015. Модель REMO2015 первоначально была разработана в Институте метеорологии им. Макса Планка, и в настоящее время усовершенствуется и поддерживается Центром климатического обслуживания Германии (GERICS) в Гамбурге. Данная модель была многократно успешно верифицирована при моделировании современных климатических условий практически всех европейских стран и была одной из базовых моделей европейских проектов FP-6 CECILIA⁸ и CLAVIER⁹, где использовалась для моделирования изменений климата в странах восточной Европы.

В работе использовались данные моделей для двух временных отрезков: для исторического периода (1970 –2005 гг.) и будущего периода (2006 – 2099 гг.). Горизонтальное разрешение данных составляет 0,22 градуса. Как и для наблюдаемых характеристик данные модели также представлены тремя переменными – температура и влажность воздуха, количество осадков.

⁸ <http://www.cecilia-eu.org/>

⁹ <http://www.clavier-eu.org/>

4. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ

4.1. Описание методики (модели)

Основой работы является детерминированная модель формирования стока Гидрограф, разработанная в ГГИ (Виноградов и Виноградова, 2010) и развиваемая коллективом под руководством О.М. Макарьевой (Semenova et al., 2013; Макарьева и др., 2019а,б).

Модель Гидрограф зарекомендовала себя работоспособным инструментом исследования и прогноза гидрологических процессов в различных физико-географических зонах (Макарьева и др., 2019а; Semenova et al., 2013), в том числе и на неизученных речных бассейнах (Макарьева и др., 2019б; Lebedeva et al., 2015). Алгоритмы модели сочетают физически-обоснованные и концептуальные подходы в описании процессов наземного гидрологического цикла, что позволяет сохранить баланс между сложностью расчетных схем и ориентацией на ограниченную входную информацию для моделирования. Выпадение и задержание осадков, накопление, уплотнение и стаивание снежного покрова, динамика влаги и тепла в снеге и в верхних горизонтах грунта, включая промерзание и протаивание, описываются в модели в явном виде.

Метод расчета тепловой динамики в верхнем слое почвогрунтов основан на нескольких приемах, упрощающих дифференциальное уравнение теплопроводности в почвенном профиле и позволяющих привести систему дифференциальных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений без потери качества результатов расчета.

В качестве параметров модели используются физические свойства материалов, слагающих почвенный профиль, такие как плотность, пористость, удельная теплопроводность и теплоемкость, максимальная водоудерживающая способность. На основе данных наблюдений такие свойства могут быть обобщены и систематизированы для почвенных профилей, характерных для основных ландшафтов. Алгоритмы, описывающие процессы теплового баланса почвогрунтов и результаты верификации предложенного метода опубликованы в работах (Лебедева и др., 2015; Semenova et al., 2015; Lebedeva et al., 2015). Подземное питание, склоновая и русловая трансформация стока, ветровое перераспределение снега, испарение рассчитываются концептуальными методами, которые показали свою эффективность в различных условиях холодных регионов (Semenova et al., 2013; Макарьева и др., 2020).

Использование в качестве входной информации небольшого числа метеорологических переменных (температура и влажность воздуха, осадки) позволяет применять модель на малоизученных речных бассейнах. Результатом моделирования служат расходы воды в замыкающем створе, элементы водного баланса и переменные состояния водосбора.

Основные параметры модели относятся к стокоформирующим комплексам – сходным по характеристикам почвы и растительности типам подстилающей поверхности на водосборе. Наборы параметров, уточненные на изученных водосборах (бассейнах-аналогах), можно переносить на неизученные бассейны со сходными типами подстилающей поверхности без калибровки (Semenova и др., 2013; Лебедева и др., 2015; Макарьева и др., 2019а,б). Это свойство модели Гидрограф позволяет применять ее в задаче оценки изменений гидротермического режима ландшафтов и речного стока в связи с прогнозируемыми изменениями климата и техногенным воздействием. Модель Гидрограф применяется на водосборах любых размеров от почвенной колонки (Лебедева и др., 2015) до бассейна р. Лены (Vinogradov et al., 2011) без изменения структуры и алгоритмов.

В предлагаемом методе отсутствуют ограничения, связанные с допущением о стационарности моделируемой системы, принятом в большинстве моделей взаимодействия поверхности суши с атмосферой. Изменения ландшафтов после нарушений (лесной пожар, вырубка, техногенное воздействие) могут быть описаны динамическим набором параметров, при котором значения параметров меняются в течение расчетного периода согласно схеме трансформации почвенно-растительного покрова (Semenova et al., 2015).

Использование входной метеорологической информации, согласно климатическим прогнозам, может быть применено для оценки гидротермического режима ландшафтов и речного стока в связи с прогнозируемыми изменениями климата.

В расчетах используется комплексная программа распределенной гидрологической модели «Гидрограф» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619084).

4.2. Верификация гидрологической модели

В целях параметризации бассейн р. Ия был разбит на три стокоформирующих комплекса (СФК): гольцы, темнохвойный лес и долины рек (рисунок 2). Оконтуривание СФК проводилось на основе спутниковых снимков Landsat и ландшафтной карты СССР

(Ландшафтная карта СССР, 1980). Данный подход позволяет расширять информацию, полученную с помощью снимков, подробными описаниями ландшафтов.

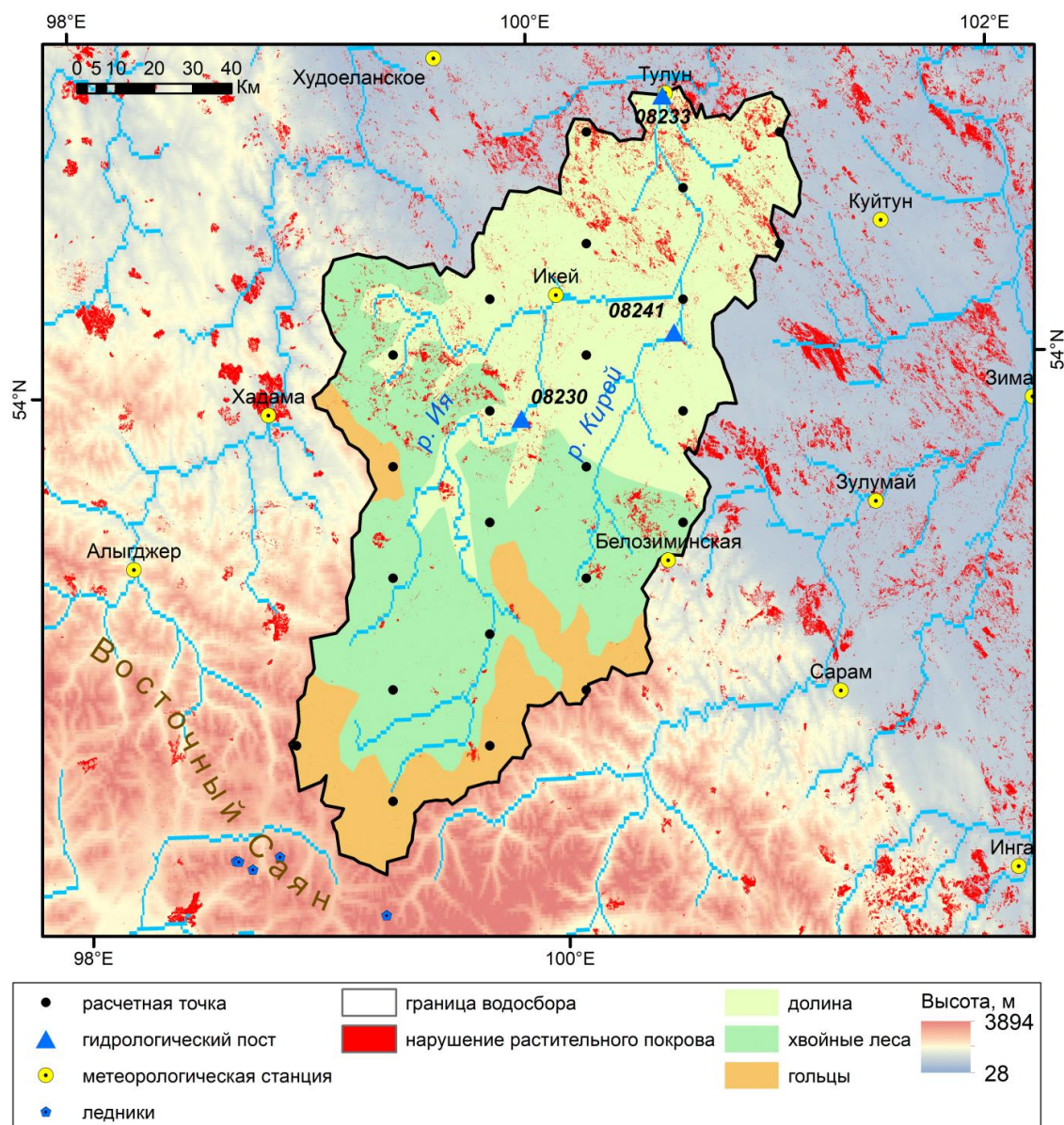


Рисунок 3. Схематизация и выделение СФК в бассейне реки Ия – г. Тулун.

Гольцовый комплекс сформирован альпинотипными горами с распространенными на них тундрами, покрытыми стлаником, и голыми скалами. Темнохвойный лес состоит из кедра, пихт и елей на горных склонах. Долины рек представляют собой поймы и надпойменные террасы с лугами и злаково-разнотравными лесами с участками низинных болот. В пределах гольцов формируется быстрый сток с отсутствием перехвата влаги растительностью и малым задержанием влаги в почво-грунтах, хвойные леса, наоборот, отличаются большой способностью перехвата и формированием почвенного стока. В

пределах долинного комплекса значительную роль играет испарение, величина которого может превышать 80% от годового количества осадков.

Водосбор р. Ия также был покрыт регулярной сеткой репрезентативных точек (РТ), в узлы которой в процессе моделирования с учетом высотных градиентов интерполируются данные метеорологических станций.

Параметры СФК определялись на основе ранее выполненных работ (Макарьева и др., 2019а; Макарьева и др., 2020) с использованием справочных материалов о водно-физических свойствах почвогрунтов¹⁰, а также материалов наблюдений на опорных станциях комплексной водобалансовой и агрометеорологической сети почвенно-испарительных и снегоиспарительных пунктов¹¹. В настоящей работе были использованы сведения станции Солянка (Красноярский край, 365 км от г. Тулун) об агрогидрологических свойствах почвы, глубине протаивания и промерзания, испарении с поверхности суши и снежного покрова.

Для верификации модели проведено моделирование стока для трех действующих створов с суточным шагом. Период моделирования 1970 – 1996 гг. определялся наличием метеоданных для 7 станций, в том числе м/с Белозиминской, наиболее репрезентативной для горной части водосбора и закрытой после 1996 г.

Результаты моделирования элементов водного баланса и величины критерия эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа (NS) (Nash et al., 1970) представлены в таблице 3.

¹⁰ Агрогидрологические свойства почв Иркутской области (справочник). 1968. Иркутск. 549 с.

¹¹ Материалы наблюдений опорных станций комплексной водобалансовой и агрометеорологической сети, почвенноиспарительных и снегоиспарительных пунктов. Новосибирск.

Таблица 3. Параметры оценки результатов верификации модели.

Код поста	8230	8233	8241
Река – створ	Ия – Аршан	Ия – Тулун	Кирей – Уйгат
Период	1970-1996	1970-1996	1970-1996
Площадь водосбора, м ²	5140	14500	2950
Наблюденный среднегодовой слой стока, мм	540	326	374
Расчитанный среднегодовой слой стока, мм	528	338	402
Расчитанные осадки, мм	771	586	688
Расчитанное испарение, мм	243	247	286
NS (m/av)	0,69/0,62	0,72/0,67	0,66/0,57
NS (max, год)	0,80 (1974)	0,86 (1972)	0,85 (1972)
NS (min, год)	0,10 (1971)	0,32 (1983)	-0,11 (1993)

Примечание: *m* и *av* – медиана и среднее значение NS; *max* и *min* – максимальное и минимальное значение NS.

Расчитанные величины среднемноголетнего годового слоя осадков составили 586 мм для бассейна р. Ия – г. Тулун и 771 мм для р. Ия – п. Аршан. Расчитанные и наблюдаемые величины стока составили 338 и 326 мм для р. Ия – г. Тулун и 528 и 540 мм для р. Ия – п. Аршан. Расчитанная годовая величина испарения составляет около 250 мм.

Минимальные и максимальные значения годового слоя осадков и стока в бассейне р. Ия – г. Тулун наблюдались в 1993 и 1986 годах. Они составили в 1993 г. (сухой год) 400 и 205 мм, а в 1986 г. – 765 и 440 мм соответственно.

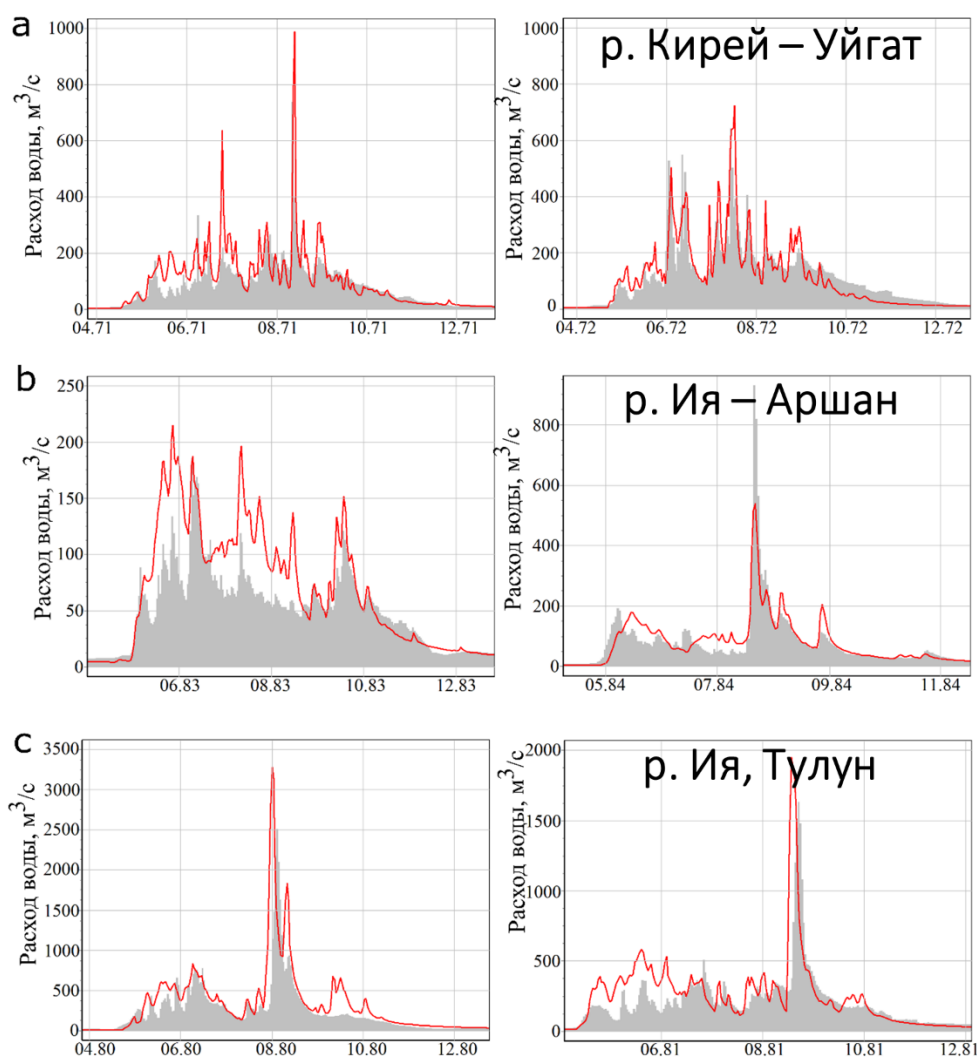


Рисунок 4. Пример рассчитанного и наблюденного гидрографа стока: а – р. Кирей, Уйгат; б – р. Ия, Аршан; с – р. Ия, Тулун

Ошибка моделирования среднемноголетней величины годового стока не превышает 7%. Критерий Нэша-Сатклиффа NS (Nash et al., 1970) составил в среднем от 0,58 до 0,68, медиана от 0,61 до 0,71. Максимальные величины NS превосходят 0,80 для каждого водосбора. Примеры сравнения наблюденных и рассчитанных гидрографов стока разной степени сходимости для трех водосборов представлены на рисунке 4.

Верификация результатов моделирования проведена также для максимальных расходов воды. На рисунке 5 приведено сравнение кривых вероятности превышения рассчитанных и наблюденных годовых максимальных расходов воды стока за период 1970-1996 гг. Кривые имеют как почти полную сходимость в области средних обеспеченностей, так и удовлетворительное совпадение в областях малых и больших обеспеченностей. В пределах обеспеченностей 8 – 17 % наблюдается некоторое превышение рассчитанных

максимальных расходов над наблюдаемыми, которое в области менее 4% переходит в превышение наблюдаемых расходов. Однако расхождение не превышает величины $300 \text{ м}^3/\text{с}$ (8 %).

Таким образом, результаты моделирования следует признать удовлетворительными, а модель «Гидрограф» пригодной для изучения процессов формирования стока рассматриваемой территории.

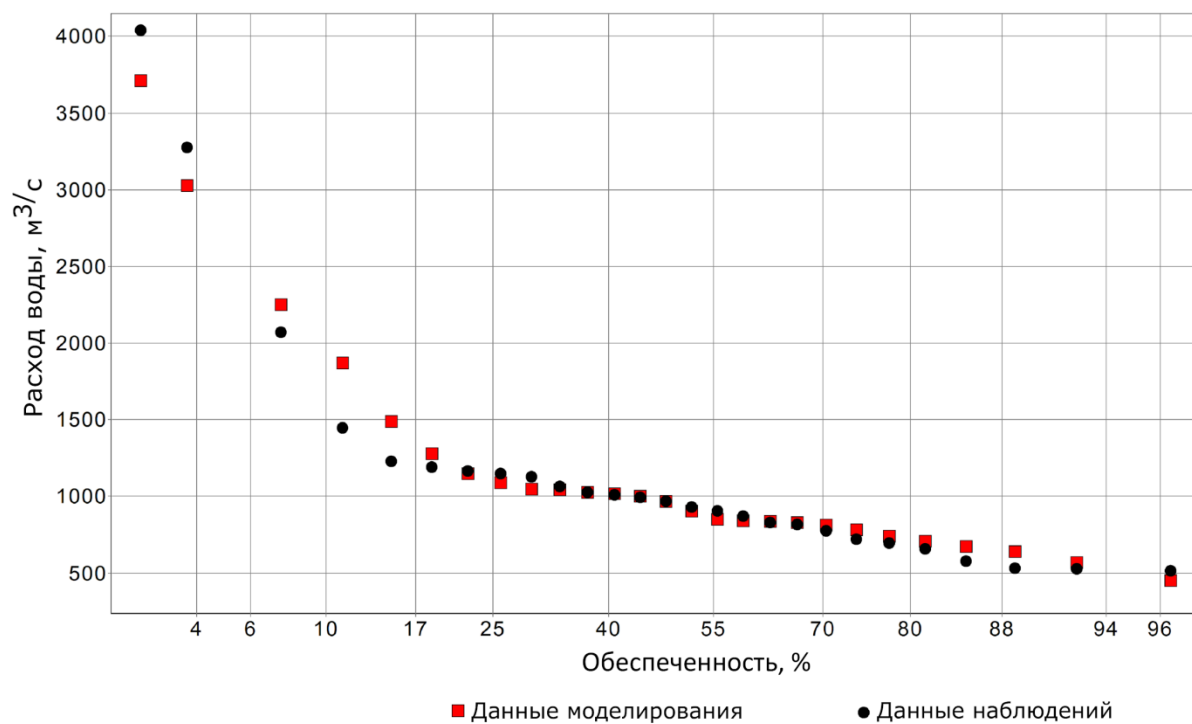


Рисунок 5. Кривые обеспеченности максимальных расходов воды по данным моделирования и наблюдений, р. Ия – г. Тулун, 1970-1996 гг.

5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПАВОДКА В ИЮНЕ 2019 ГОДА

5.1. Данные

Для оценки условия формирования катастрофического паводка 2019 года в качестве входной метеорологической информации в гидрологическую модель Гидрограф были использованы данные глобальной модели прогноза погоды ICON, разработанной метеослужбой Германии (DWD) (Zängl G et al., 2015). Суточные прогнозы данной модели от 00 ч Всемирного скоординированного времени (ВСВ) получены с ftp-сервера DWD¹² с шагом по времени 3 ч и пространственным разрешением 13 км. Такое разрешение можно считать достаточным для прогноза зон осадков, формирующихся за счет процессов синоптического масштаба (т. е. циклонов и их атмосферных фронтов).

Сравнение модельных и фактических данных об осадках на метеостанциях Тулун и Икей показало, что, согласно модели, значительные суммы осадков выпали сутками ранее, чем наблюдались фактически, однако общая сумма осадков, по данным модели и наблюдений, расходится не более чем на 7 % (рисунок 6). Но модель ICON недооценила количество осадков в центральной части бассейна, возможно, в связи со сравнительно низким пространственным разрешением, что ведет к сглаживанию полей осадков. По этой же причине модель может занижать эффект орографического усиления осадков в горах. Тем не менее данные модели позволили получить реалистичную картину пространственного распределения осадков по бассейну (рисунок 7) и объяснить некоторые ключевые особенности формирования паводка 2019 года.

¹² <http://ftp-outgoing2.dwd.de/gds/ICON/grib/europe/>

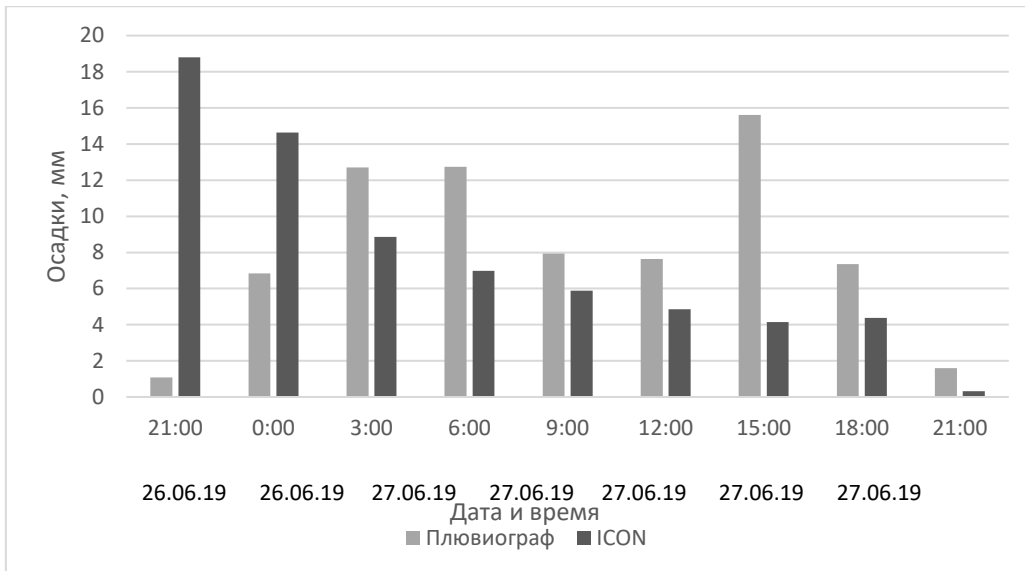


Рисунок 6. Сравнение 3 - часовых данных по осадкам на метеостанции Тулун.

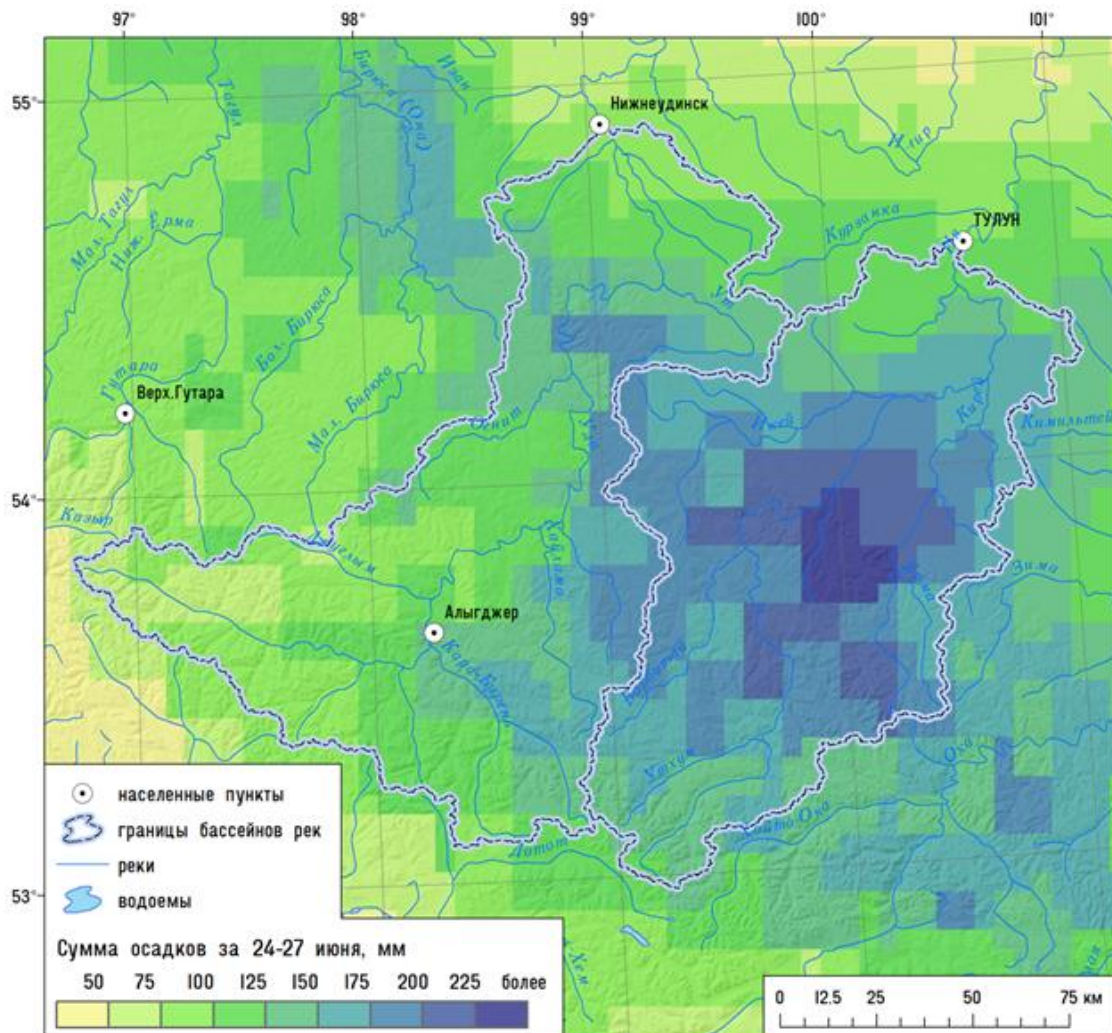


Рисунок 7. Пространственное распределение осадков за период 24-28 июня 2019 г. по данным модели ICON.

5.2. Моделирование паводка в июне 2019 года

Моделирование паводков 2019 г. по данным метеорологических станций. Для расчета гидрографов паводков летом 2019 г. на р. Ия – г. Тулун в качестве входной информации были использованы суточные метеорологические данные двух станций Иркутского УГМС Икей и Тулун. Интерполяция осадков в расчетные точки производилась с учетом распределения осадков по высоте в горной части водосбора, верифицированного на предыдущем этапе исследования.

Согласно расчетам с 25 по 27 июня 2019 года в бассейне р. Ия – г. Тулун выпало 239 мм осадков, 25 июня – 79 мм, 26 июня – 132 мм, 27 июня – 28 мм. Рассчитанный слой стока за период с 25 июня по 5 июля 2019 г. составил 162 мм, максимальное суточное значение слоя стока 30 июня 2019 г. составило 39 мм. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг значения 6570 м³/с (рисунок 8).

В конце июля 2019 г. на р. Ия прошел второй паводок. С 26 по 28 июля 2019 года, согласно расчетам, в бассейне р. Ия – г. Тулун выпало 156 мм осадков. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг величины 3100 м³/с 31 июля 2019 г.

Моделирование паводка на основе метеорологической модели ICON. В качестве начальных условий был принят 1989 год, который по условиям весеннего половодья примерно совпадал с 2019 г. Таким образом, до 31 мая моделирование проводилось на основе данных метеорологических станций за 1989 год в суточном режиме, а с 1 по 30 июня на основе 3-часовых рядов температуры и дефицита влажности воздуха и осадков модели ICON. По итогам моделирования получено, что максимальный рассчитанный 3-часовой расход составил 5260 м³/с, максимальный суточный расход составил 4780 м³/с. Слой осадков по водосбору за период 25-27 июня составил 170 мм, а слой стока паводка за период 25 июня – 5 июля 136 мм.

На рисунке 8 представлено сравнение рассчитанных гидрографов стока на основе данных модели ICON и метеостанций. По данным метеостанций максимальный расход превысил прогноз по модели ICON на 1800 м³/с, а слой стока паводка на 26 мм. Согласно расчету по данным метеостанций слой осадков, выпавших на водосбор за период 25-27 июня 2019 г. составил 239 мм, что на 70 мм больше, чем по модели ICON. Фазы поднятия и спада гидрографа паводка хорошо совпадают, однако, согласно расчету по данным модели ICON максимальный расход наступает на 1 сутки раньше.

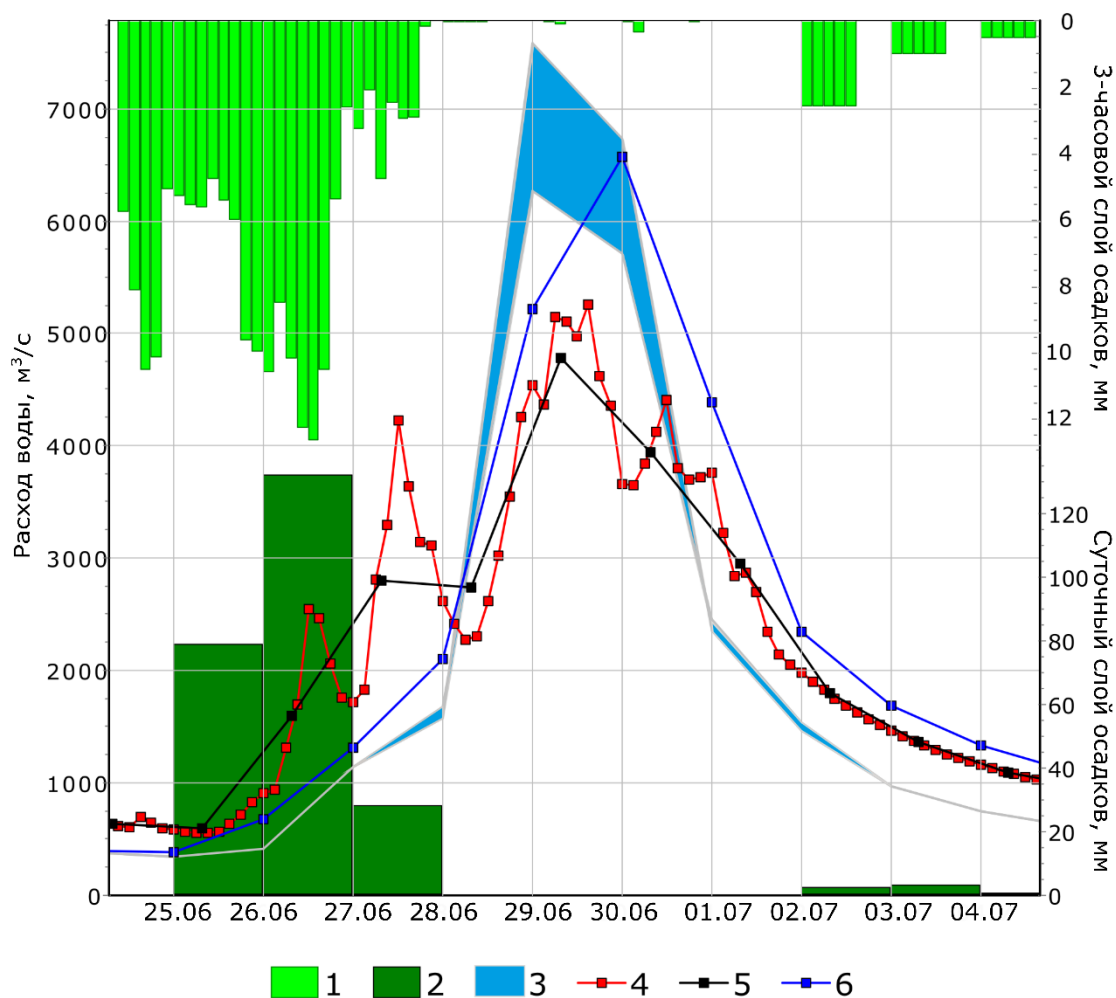


Рисунок 8. Результаты моделирования паводка в бассейне р. Ия – г. Тулун в июне 2019 г. 1 — 3-часовые осадки по модели погоды ICON, 2 — суточные осадки на основе данных метеостанций; 3 — зафиксированный гидрограф стока (на основе экстраполяции зависимостей расхода воды от уровня); гидрограф стока по данным модели погоды ICON: 4 — рассчитанный 3-часовой, 5 — осредненный суточный; 6 — рассчитанный суточный гидрограф стока на основе данных метеостанций.

6. АНАЛИЗ ДАННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

5.1. Предварительная подготовка

Данные климатических моделей на исторический период представлены для периода 1970 – 2005 гг. Для расчета климатических характеристик и дальнейшего сравнительного анализа необходимо использовать один временной период. Однако непрерывные данные наблюдений на станции Белозиминская доступны лишь до 1996 года включительно. Поэтому сравнение наблюдаемых и модельных величин для этой точки проведено для периода наличия данных наблюдений (1970 – 1996 гг). А для двух других метеорологических станций (Икей и Тулун) доступен необходимый период 1970 – 2005 гг.

Обработка исходных «сырых» данных осуществлялась с помощью инструмента Climate Data Operators (CDO)¹³, представляющего набор операторов командной строки для управления и анализа данных моделей климата. На сегодняшний день существует около 400 операторов, позволяющих проводить первичную обработку файлов. Для обработки терабайтов информации использование Python или Matlab не имеет смысла из-за длительности выполнения операций, в то время как CDO, написанные на C++, справляются с крупномасштабными задачами сравнительно быстро, при этом обладают очень простым для понимания синтаксисом¹⁴.

Несоответствие пространственного распределения узлов сетки метеорологическим станциям определенно вносит погрешности при расчете и сравнении оценочных критериев. В мировой практике зачастую применяются различные методы интерполяции данных из узлов сетки в точки метеорологических станций, однако в рамках рассмотрения ливневых осадков, методы интерполяции вносят большие погрешности, чем использование данных с ближайших узлов сетки (Яровая и Посошков, 2017). На рисунке 9 представлена схема пространственного распределения узлов сетки данных моделей, метеорологических станций, выделены узлы в пределах бассейна, а также ближайшие к расположению метеорологических станций узлы, данные с которых использованы для дальнейшей верификации.

¹³ <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>

¹⁴ <http://koldunov.net/?p=401>

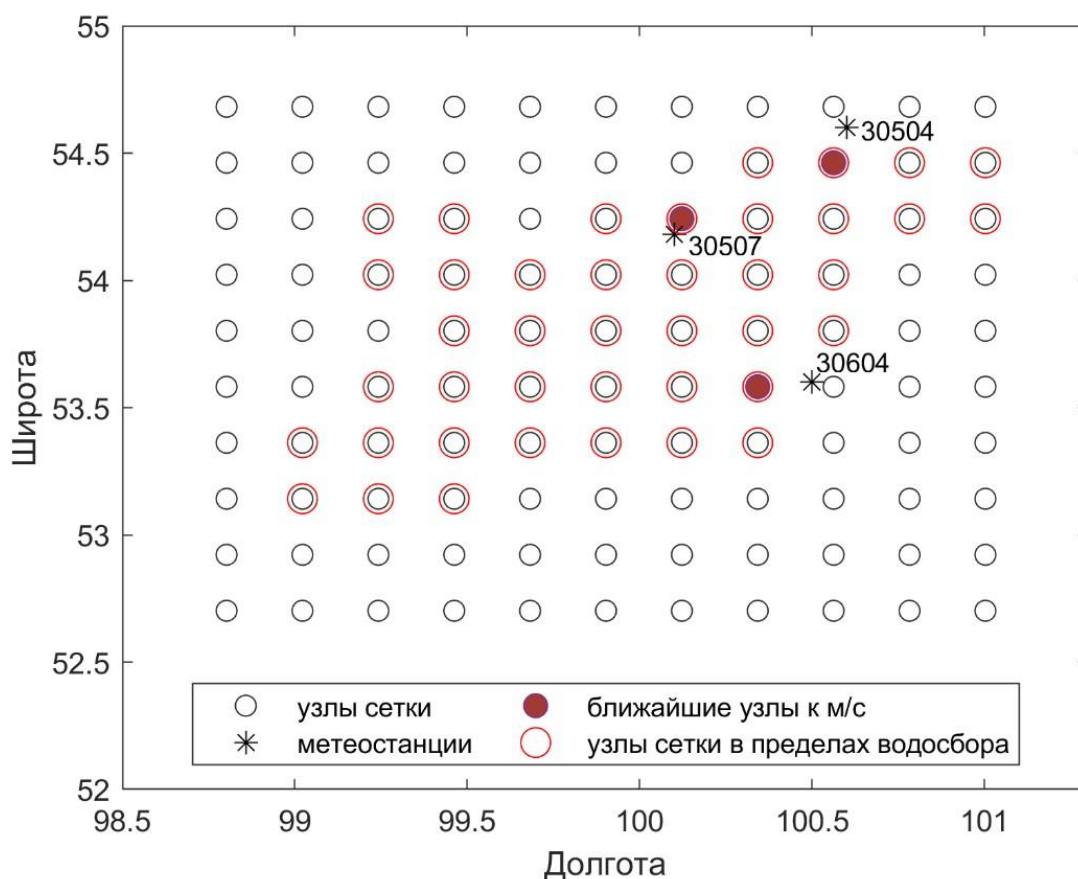


Рисунок 9. Схема пространственного расположения узлов сетки климатических моделей и метеорологических станций в бассейне р. Ия.

Отметим, что под ближайшей точкой в данной работе понимается ближайший узел сетки, который отвечает следующим требованиям: 1) расположен *в пределах* водосборного бассейна, для чего трехмерные данные климатических моделей в формате netcdf были обрезаны по маске, представляющей собой векторный полигональный shape-файла контура водосбора; 2) сами данные климатических моделей в окружающих узлах сетки точку метеорологической станции наилучшим образом согласуются с данными наблюдений, что оценивается тремя статистическими характеристиками – коэффициент корреляции, стандартное и среднеквадратическое отклонение. Данная процедура выполняется автоматически, для чего автором работы был написан скрипт на языке программирования MatLab.

5.2. Методы

Для сравнения данных климатических проекций с данными наблюдений решено использовать климатические характеристики, отражающие условия текущего года, в том числе климатические индексы экстремальности (характеристики максимальных свойств

климата на годовом отрезке времени, пригодные для характеристики климата в средних широтах) (Платонова, 2008). Индексы экстремальности были разработаны в 1999 году и рекомендованы экспертной группой по обнаружению климатических изменений, мониторингу и индексам при Комиссии по климатологии ВМО¹⁵. В данном исследовании для верификации используются данные с временным шагом, равным 1 суткам.

Верификация модельных данных осуществлялась с помощью оценочных числовых мер (формулы 1 – б), рассчитанных на основе данных наблюдений на метеорологических станциях и ближайших к ним узлам сетки, определенным ранее. Расчет климатических характеристик проводился в среде программирования MatLab, где был создан ряд скриптов и адаптирован под разные форматы исходных данных.

- 1) **ER** – **среднегодовая суточная сумма осадков** (мм/день) – равносильна годовой сумме осадков:

$$ER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (1)$$

где N – количество дней в году, p_i – суточная сумма осадков.

- 2) **R10** – **количество дней с осадками не ниже 10 мм** (дни) – характеризует повторяемость сильных осадков более 10 мм/сут:

$$R10 = \sum_{i=1}^{N1} p_i > 10 \quad (2)$$

где $N1$ – длина ряда с осадками более 10 мм/сут;

- 3) **R1d** – **максимальное за год значение суточных осадков** (мм):

$$R1d = \max(p_i) \quad (3)$$

- 4) **R5d** – **максимальная пентадная сумма осадков** (мм) – максимальное в году количество осадков, выпавших за последовательные пять суток (индекс выявляет ситуации, ассоциируемые с возникновением дождевых паводков):

$$R5d = \max \left(\sum_t p_{idt}, t=[d-2, d+2] \right) \quad (4)$$

¹⁵ <http://www.clivar.org/>

- 5) **SDII – интенсивность осадков** (мм/сут) – годовая сумма осадков (не включая осадки < 1 мм), деленная на число дней с осадками не ниже 1 мм:

$$SDII = \frac{\sum_{i=1}^N p_{i \geq 1}}{N_{p_{i \geq 1}}} \quad (5)$$

- 6) **R95T – доля интенсивных осадков в годовой сумме (%)** – процентное отношение суммы интенсивных осадков (суточная сумма осадков выше 95%-перцентиля R95 за период наблюдений (в нашем случае за 27 лет суточных наблюдений)):

$$R95T = \frac{\sum_i p_{i, p_i > p_{95}}}{\sum_i p_i} \quad (6)$$

Для визуализации рассчитанных величин построены кривые распределения Гамбеля. Распределение Гамбеля входит в семейство непрерывных распределений вероятностей, разработанных в рамках теории экстремальных значений. В зарубежной литературе именуется как «Generalized Extreme Value (GEV) distribution». Теория экстремальных значений обеспечивает статистическую основу, позволяющую делать выводы о вероятности очень редких или экстремальных событий.

Построение кривых распределения основано на использовании функции, представленной в работе (Cheynet, 2021), более подробное описание представлено в (Holmes, 2015). Код функции был несколько изменен автором настоящей работы для более наглядного представления результатов характеристик об осадках.

Графики распределения обобщенных экстремальных значений эквиваленты принятым в отечественной гидрологии кривым обеспеченности. По оси Y расположены максимальные величины осадков, по оси X – период повторяемости (the return period), выраженный в годах. Таким образом, для 50-летнего периода повторяемости величина осадков имеет вероятность превышения 0,02 или (1/50) в любой год. Для 100 летнего периода – 0,01 или (1/100) и т.д.

Для оценки климатических характеристик применялись следующие описательные статистики: минимальное (min), максимальное (max), среднее (mean), средняя ошибка (ME), средняя абсолютная ошибка (MAE), квадратичная ошибка (MSE), стандартное отклонение (STD), среднеквадратическое отклонение (RMSD), коэффициент корреляции (R) – формулы 7-12.

Средняя ошибка (ME):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n) \quad (7)$$

Средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |f_n - r_n| \quad (8)$$

Среднеквадратичная ошибка (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2 \quad (9)$$

Стандартное отклонение (STD или σ) используют для анализа наборов значений, когда два набора с одинаковым средним значением могут оказаться совершенно разными по разбросу величин (показывает, как распределены значения выборки относительно среднего – на сколько велик разброс величины от года к году, стандартное отклонение близкое к нулю указывает на низкую вариабельность данных):

$$STD_f = \left[\frac{\sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Среднеквадратическое отклонение определяется как:

$$RMSD = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f}) - (r_n - \bar{r})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Коэффициент корреляции (R) характеризует существование линейной зависимости между двумя величинами, используется для количественной оценки сходства двух рядов. При рассмотрении двух переменных f_n и r_n , которые определены в N дискретных точках (во времени или пространстве) коэффициент корреляции между ними определяется как:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{STD_f STD_r} \quad (12)$$

где \bar{f} и \bar{r} – средние значения рядов, STD_f и STD_r – стандартные отклонения.

Коэффициент корреляции достигает максимального значения 1, когда для всех n $(f_n - \bar{f}) = \alpha(r_n - \bar{r})$, где α – положительная константа.

5.3. Результаты

5.3.1. Сравнение кривых вероятности превышения климатических характеристик для исторического периода 1970-2005

Были рассчитаны климатические характеристики (формулы 1 – 6), построены кривые распределения (рисунки 10 – 17) и рассчитаны статистические характеристики (таблицы 4 – 11). Нижеприведенные выводы основаны на визуальной оценке графиков 6 – 13, а также сравнении статистических характеристик, представленных в таблицах 4 – 11.

Годовая сумма осадков. На рисунке 10 показано, что для метеорологических станций 30504 и 30507, расположенных на высоте 522 и 527 м соответственно (далее «равнинная часть») модели NCC-NorESM1-M и MPI-M-MPI-ESM-LR значительно завышают годовые суммы осадков – разница между максимальными величинами составляет около 20%. Лучше всего с данными наблюдений согласуются данные модели МОНС-HadGEM2-ES с максимальным несоответствием 7%. Для метеорологической станции 30604, расположенной на высоте 755 метров (далее «горная» часть) наблюдается противоположная ситуация: модели MPI-M-MPI-ESM-LR и МОНС-HadGEM2-ES в значительной степени занижают величины до 25%, в то время как расхождение с данными модели NCC-NorESM1-M составляет около 4%.

Максимальные суточные осадки. Всеми моделями плохо воспроизводятся экстремумы (рисунок 11), но стоит отметить модель NCC-NorESM1-M, для м/с 30504 погрешность в максимальных характеристиках составляет порядка 10%, но в тоже время отмечается систематическое завышение максимальных суточных сумм осадков.

Максимальные суммы осадков за 2 дня. Для м/с 30504 модель NCC-NorESM1-M завышает значения до 60%, однако для м/с 30507 и 30604 экстремумы, согласно этой

модели, лучше согласуются с данными наблюдений, расхождение максимумов составляет 7% (рисунок 12).

Максимальные суммы осадков за 5 дня. Для данной характеристики сложно сделать однозначное заключение: для м/с 30504 модель NCC-NorESM1-M завышает значения до 35%, для м/с 30507 максимальное значение пятидневных осадков удовлетворительно описывается всеми моделями – разница не более 2%. Для м/с 30604 модель NCC-NorESM1-M, с одной стороны, воспроизводит экстремумы в отличие от других, однако в большинстве случаев значительно завышает до 25% (рисунок 13).

Количество дней с осадками более 10 мм. По этой характеристике с данными наблюдений лучше согласуются результаты модели NCC-NorESM1-M, как для экстремумов, так и по всему ходу кривой вероятности превышения, максимальная погрешность составляет 15% (рисунок 14).

Доля интенсивных осадков в годовой сумме. По данным климатических моделей для равнинной местности доли интенсивных осадков занижены всеми моделями, а для горной местности данные модели NCC-NorESM1-M, несмотря на лучшую согласованность с данными наблюдений в большинстве случаев, экстремумы все же не сопоставимы с данными наблюдений – ошибка составляет порядка 10% (рисунок 15).

Годовая интенсивность осадков. Для метеостанций, расположенных на равнинной местности, отмечается практически полное соответствие данных климатической модели NCC-NorESM1-M данным наблюдений – разница не более 3% (рисунок 16). Для горной местности кривая повторяемости по данным модели NCC-NorESM1-M хотя и практически совпадает с кривой повторяемости по данным наблюдений, однако наблюдаемый экстремум не улавливается моделью.

Таким образом, на основе анализа невозможно однозначно выделить модель, результаты которой наилучшим образом соответствуют данным наблюдений. Однако отмечены следующие закономерности: модель NCC-NorESM1-M преимущественно завышает климатические характеристики для равнинной территории, однако лучше воспроизводит осадки в горной местности. Для равнинной местности выделена модель MPI-M-MPI-ESM-LR как наиболее точно описывающая наблюдаемые величины. Также стоит отметить, что суточные экстремумы, являющиеся основной причиной формирования паводочных наводнений, неудовлетворительно воспроизводят все модели. Осадки по данным модели NCC-NorESM1-M более сглажены во времени, что хорошо проявляется при рассмотрении максимальных сумм осадков за 2 и 5 дней.

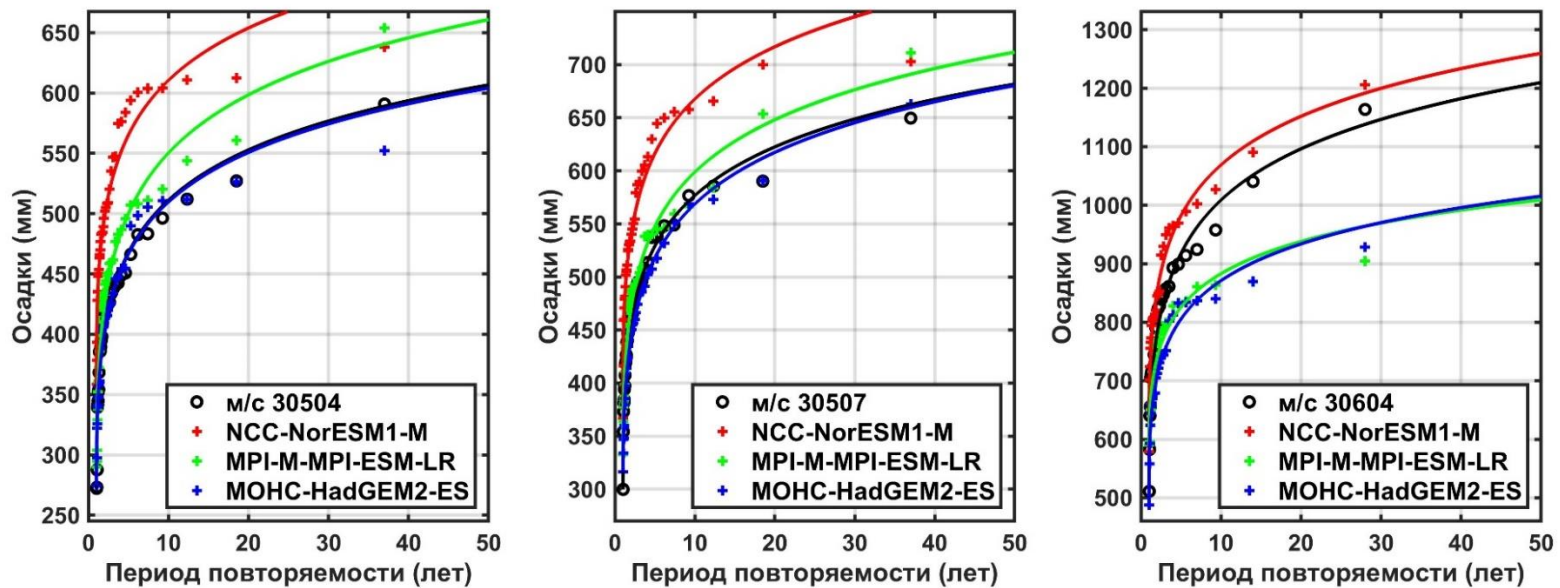


Рисунок 10. Сравнение кривых распределения годовых сумм осадков по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005(м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

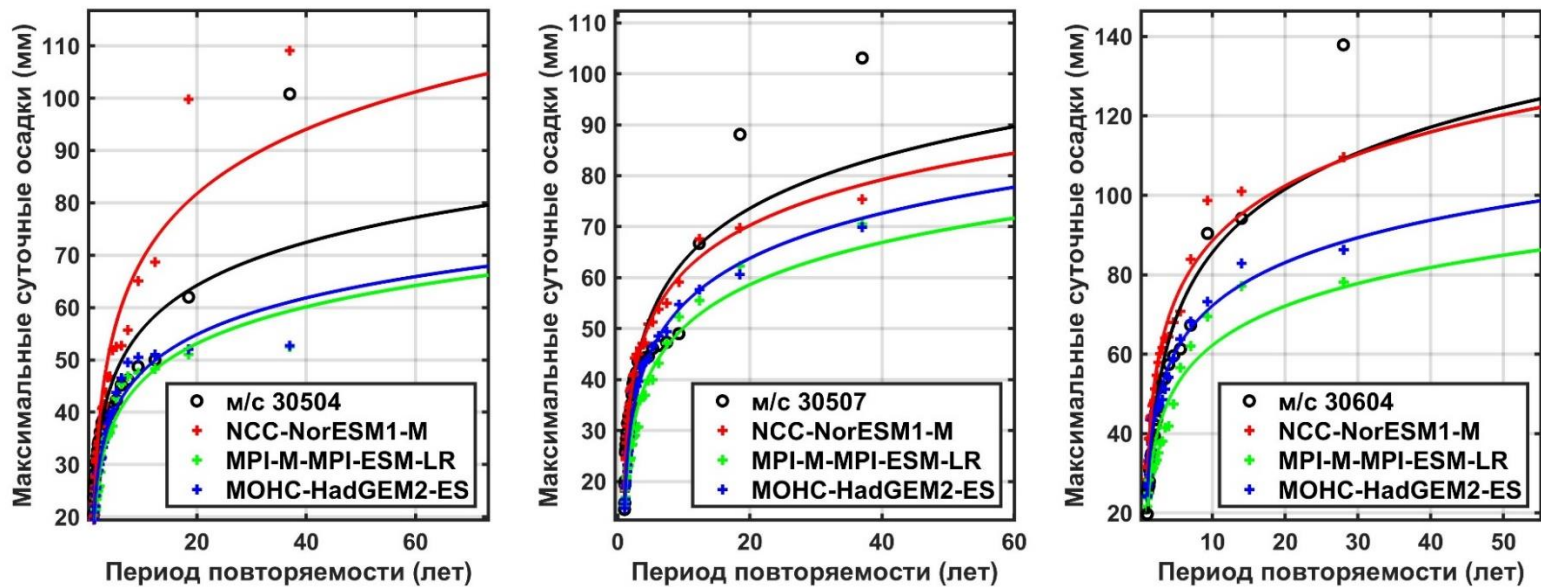


Рисунок 11. Сравнение кривых распределения годовых максимальных осадков (R1d) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005(м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

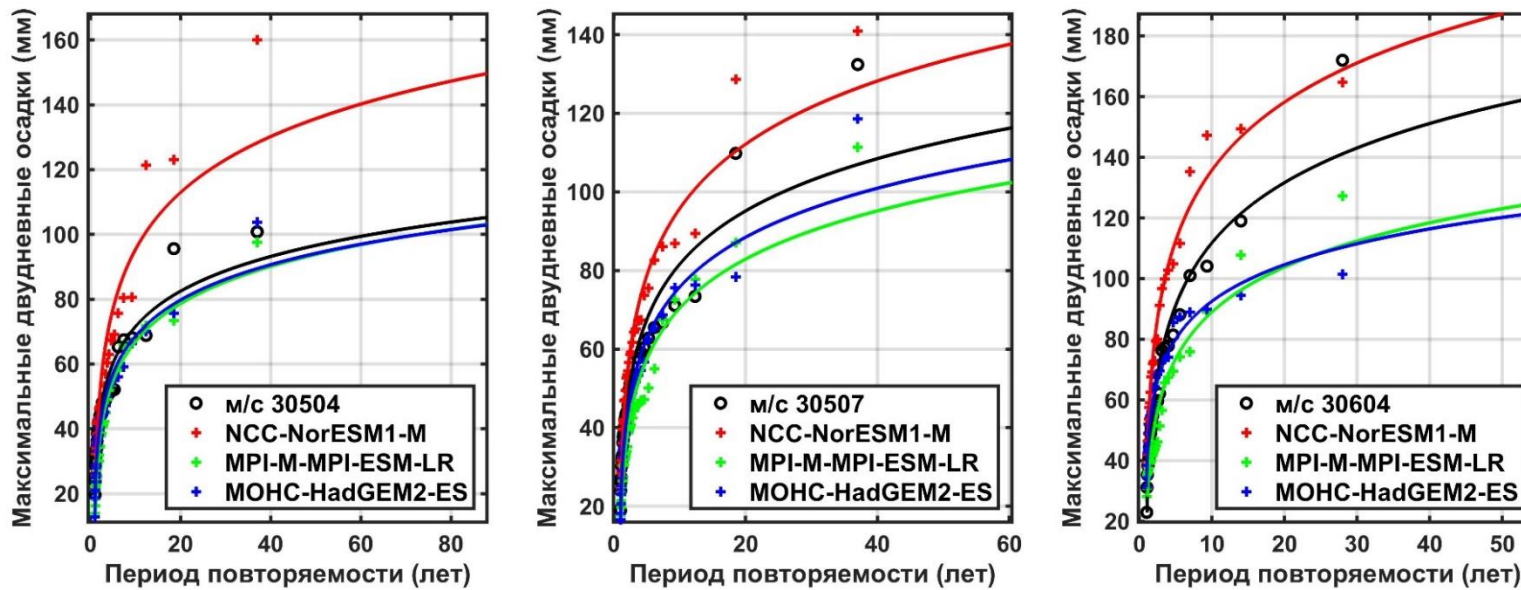


Рисунок 12. Сравнение кривых распределения годовых двудневных максимальных сумм осадков (R_{2d}) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

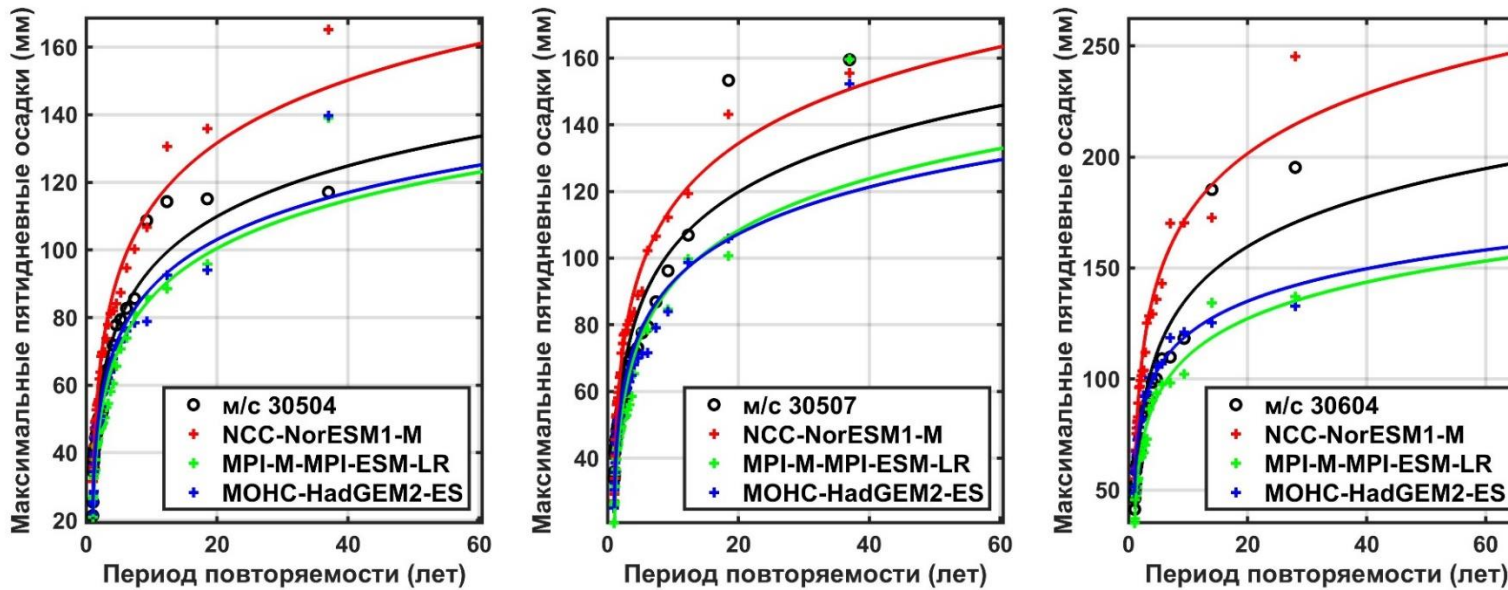


Рисунок 13. Сравнение кривых распределения годовых пятидневных максимальных сумм осадков (R_{5d}) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

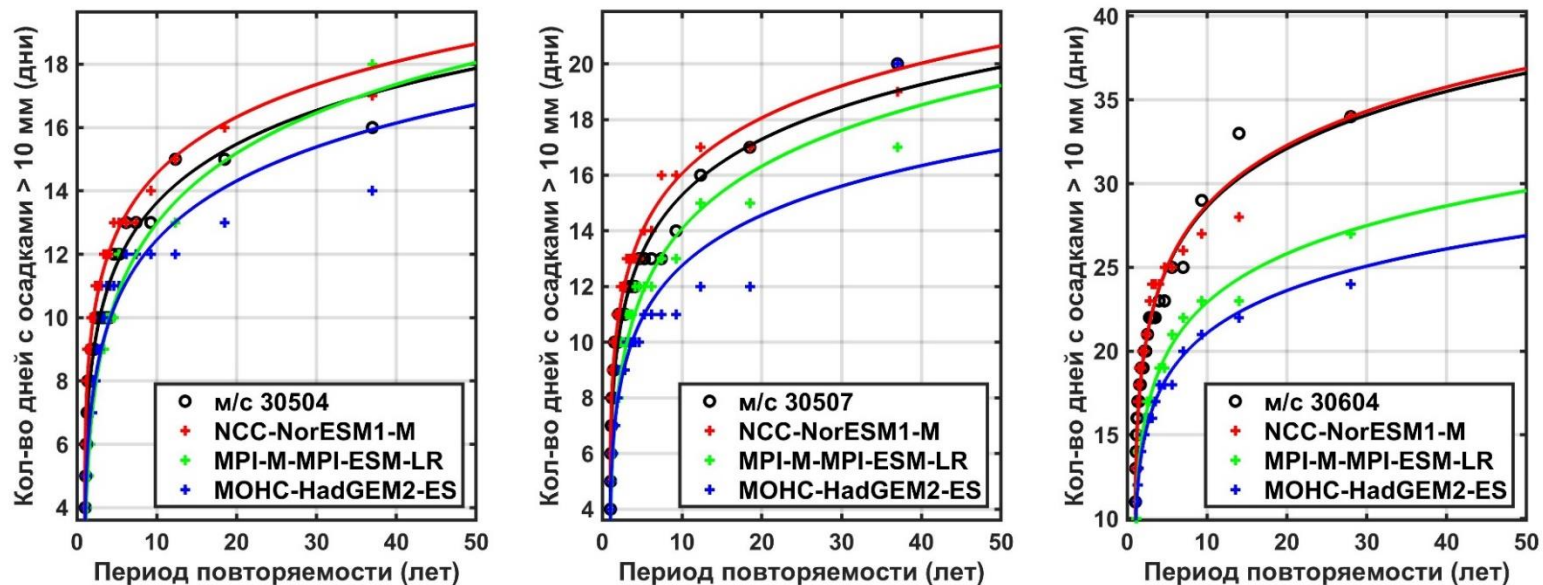


Рисунок 14. Сравнение кривых распределения сумм дней с осадками не ниже 10 мм (R10) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

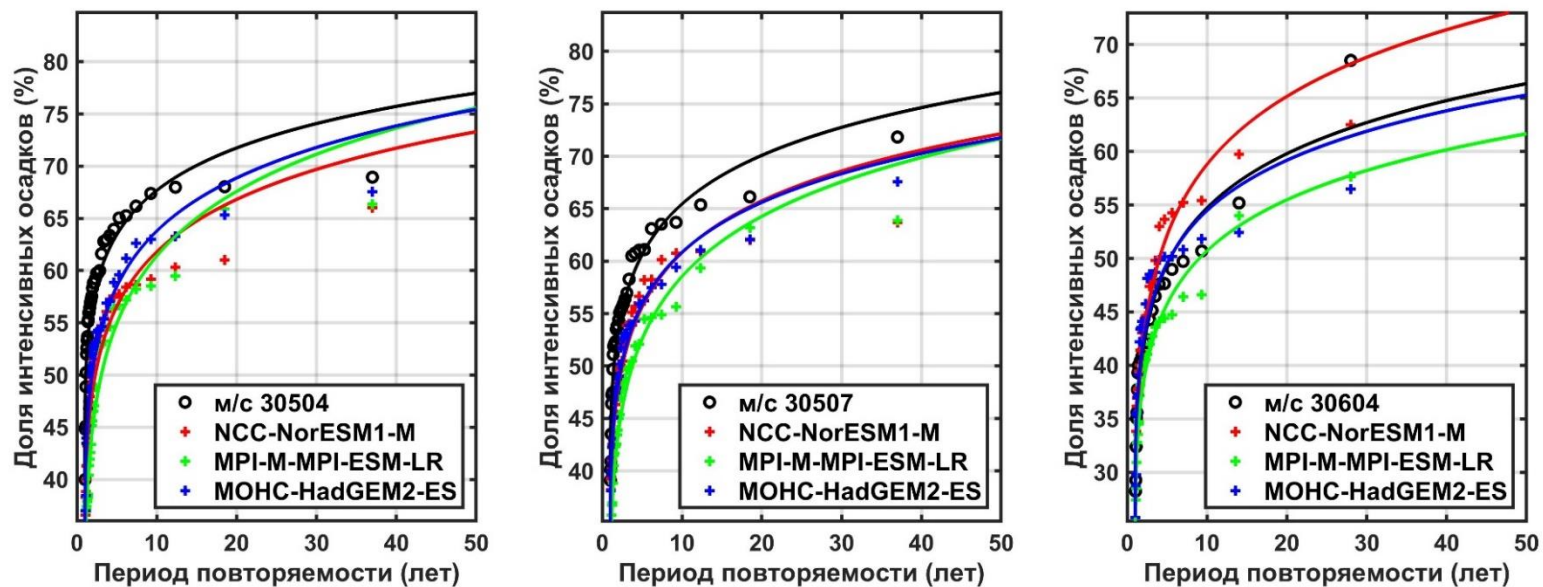


Рисунок 15. Сравнение кривых распределения долей интенсивных осадков в годовой сумме (R95) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

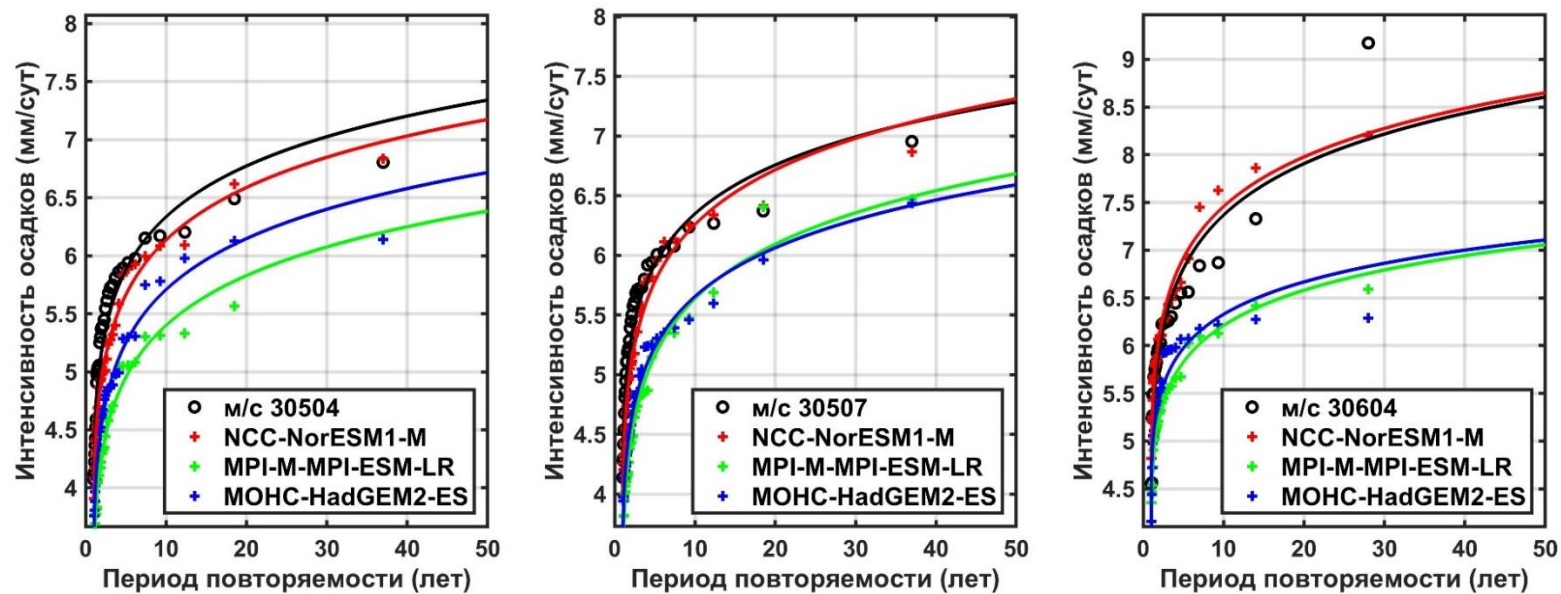


Рисунок 16. Сравнение кривых распределения годовых интенсивностей осадков (SDII) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

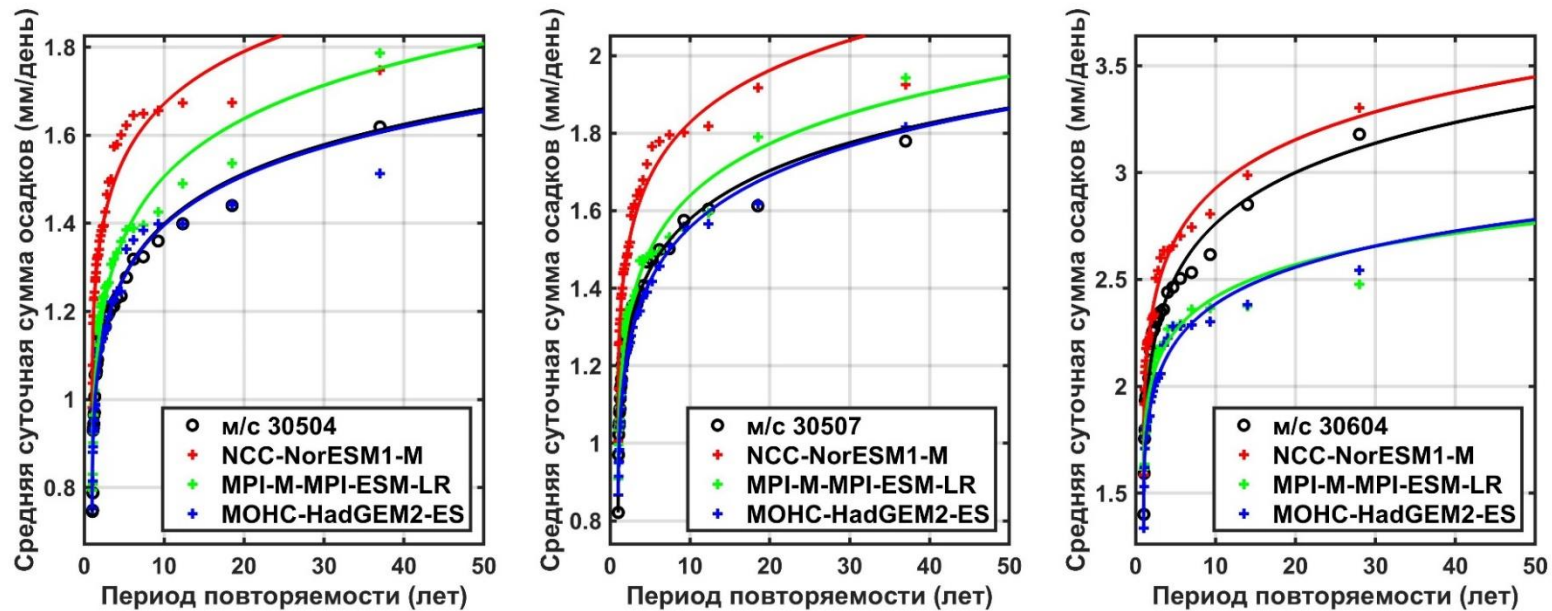


Рисунок 17. Сравнение кривых распределения среднегодовых суточных сумм осадков (ER) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

5.3.2. Сравнение трендов климатических характеристик для исторического периода 1970-2005

В целях сравнения рассчитанных характеристик по данным наблюдений и данным климатических моделей также был проведен анализ наличия трендов методом Манна-Кендалла для исторического периода, и для наглядности построены графики хронологического хода климатических характеристик с нанесением линейного тренда, даже при отсутствии статистически значимого тренда (рисунки 18 – 25).

Статистически значимый тренд с уровнем значимости $p < 0.05$ отмечен только для двух характеристик по данным модели NCC-NorESM1-M: доля интенсивных осадков в годовой сумме и максимальные пятидневные суммы осадков для точки сравнения, относящейся к м/с 30507 – для обеих характеристик отмечен статистически значимый отрицательный тренд с уровнем значимости 0.04 и 0.05 соответственно.

Однако стоит отметить следующее: максимальные 1, 2, 5-суточные суммы осадков (рисунки 19 – 21) уменьшаются как согласно данным наблюдений, так и данным модели NCC-NorESM1-M, однако статистически значимого тренда не наблюдается.

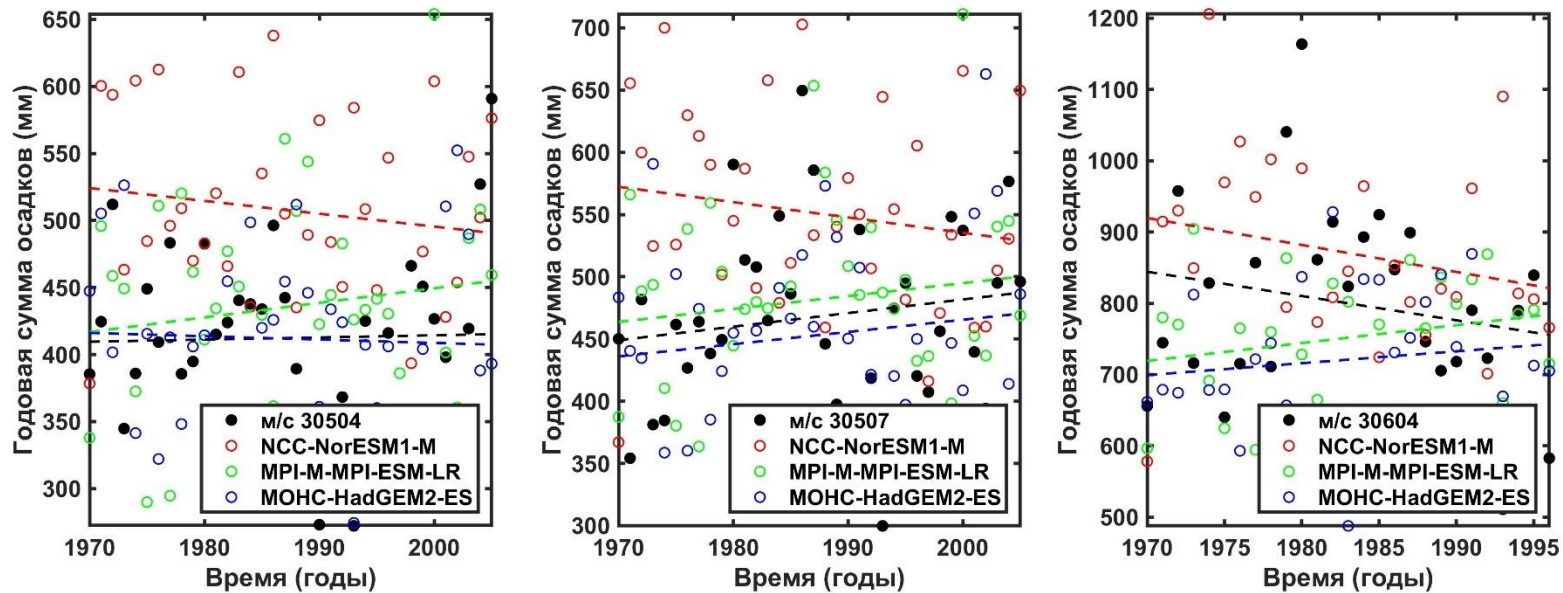


Рисунок 18. Сравнение годовых сумм осадков по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

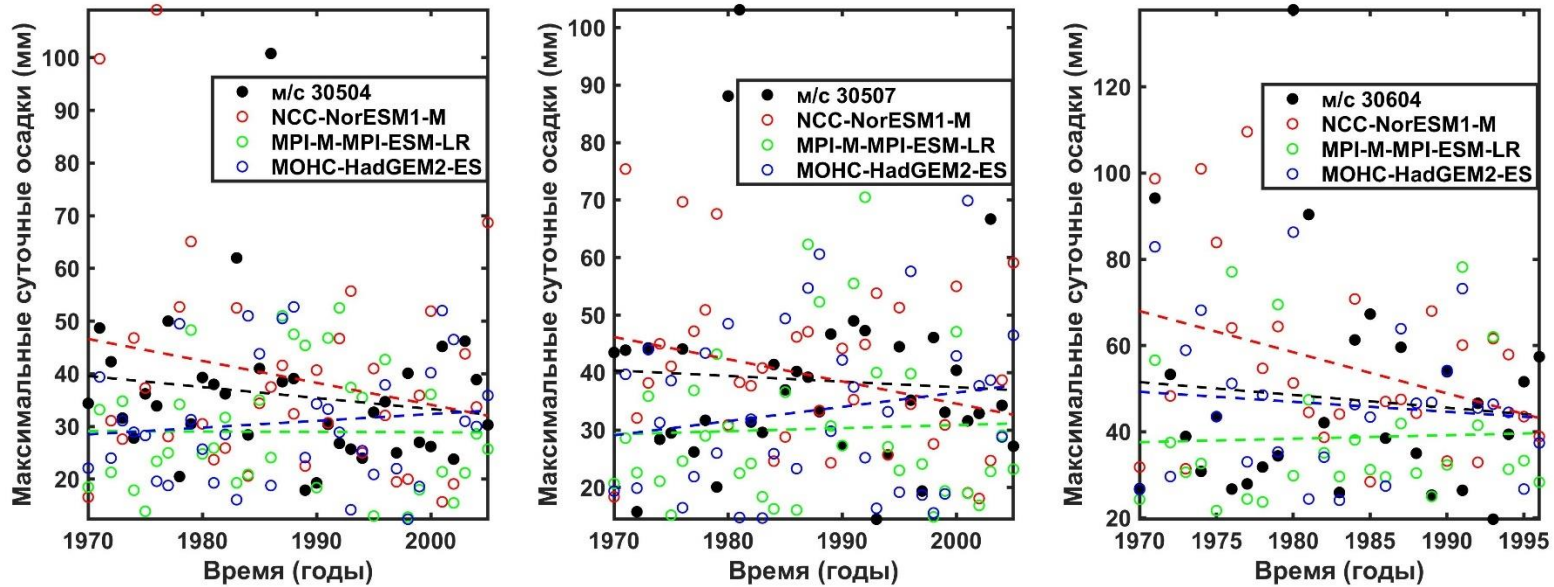


Рисунок 19. Сравнение годовых максимальных осадков (R_{1d}) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

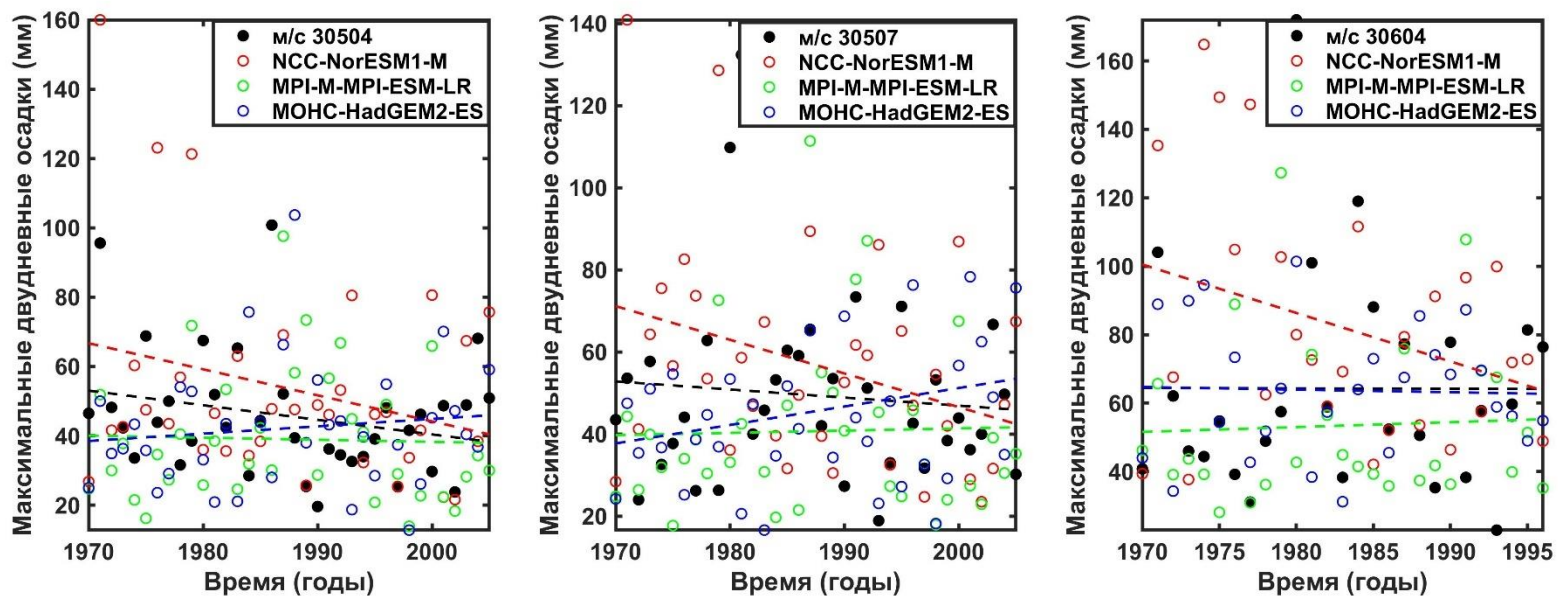


Рисунок 20. Сравнение годовых двухдневных максимальных сумм осадков ($R2d$) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

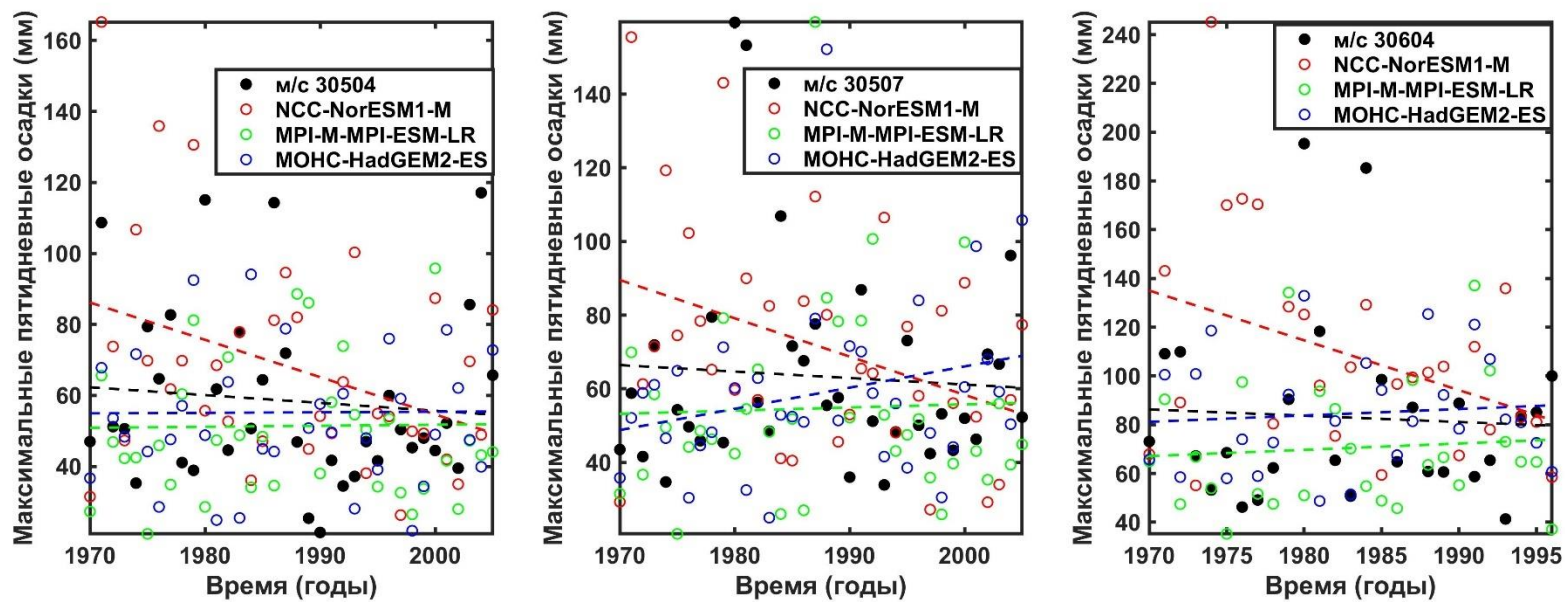


Рисунок 21. Сравнение годовых пятидневных максимальных сумм осадков ($R5d$) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

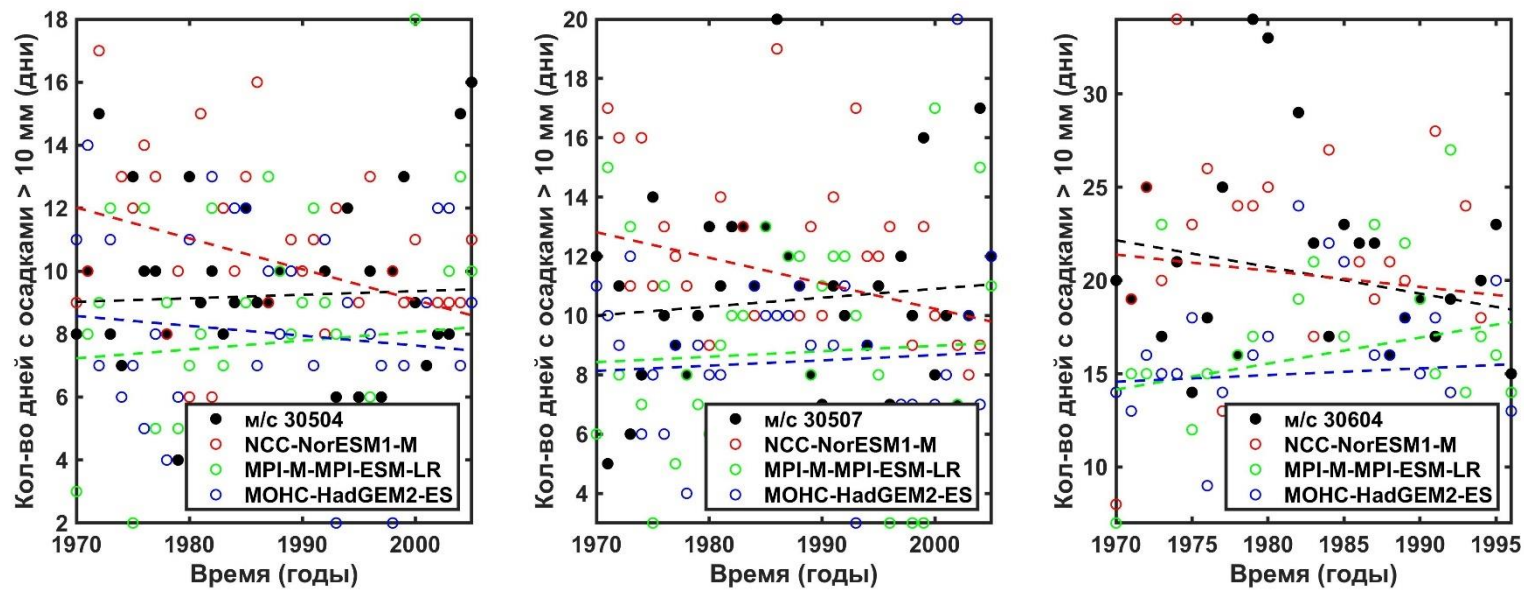


Рисунок 22. Сравнение сумм дней с осадками не ниже 10 мм (R_{10}) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

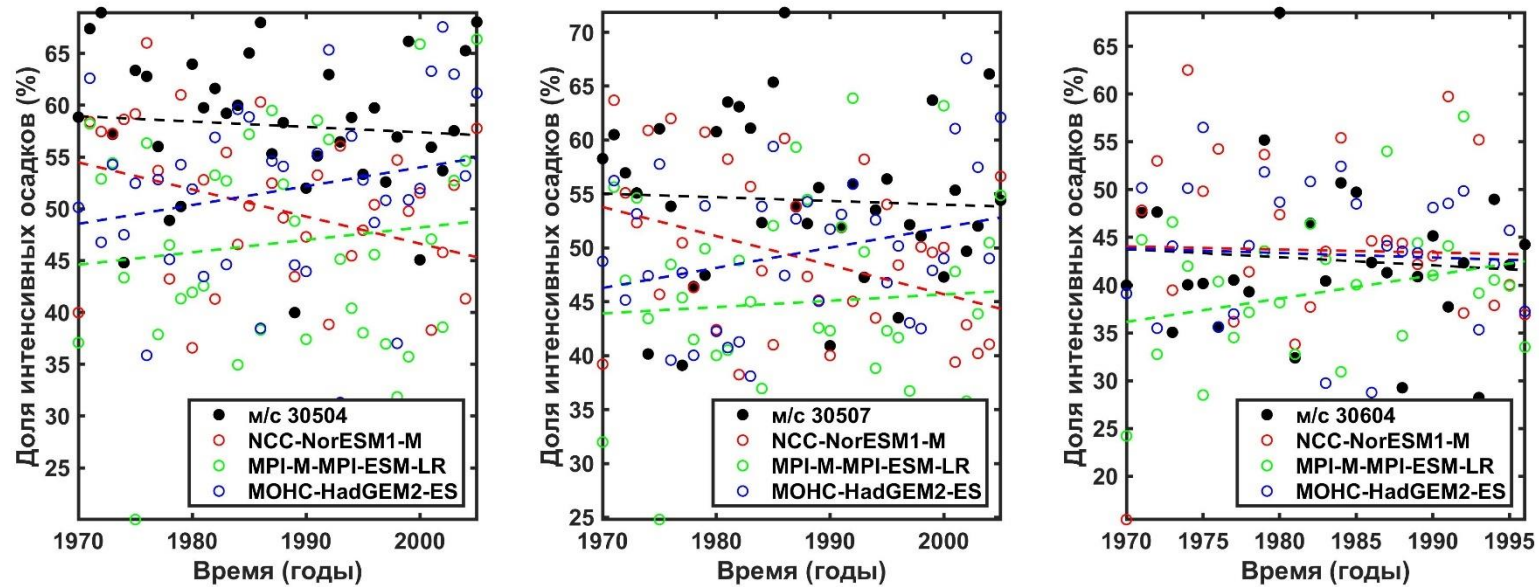


Рисунок 23. Сравнение долей интенсивных осадков в годовой сумме (R_{95}) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

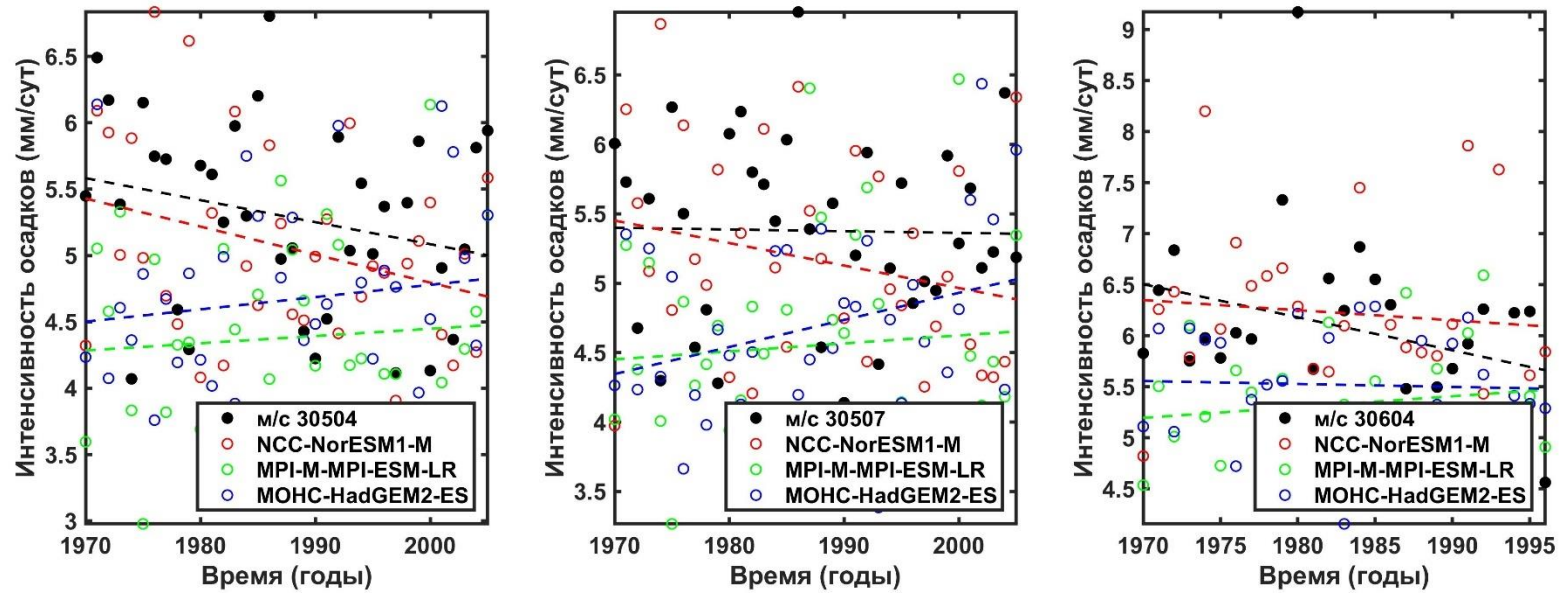


Рисунок 24. Сравнение годовых интенсивностей осадков (*SDII*) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

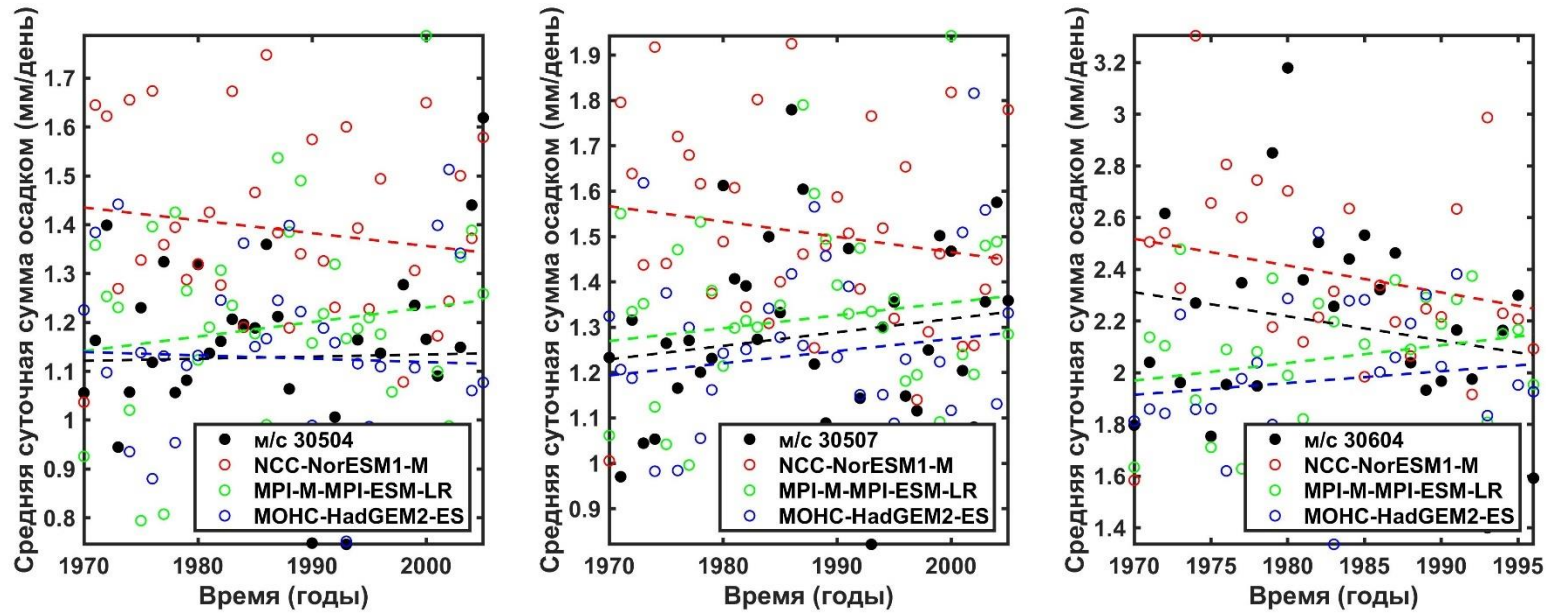


Рисунок 25. Сравнение среднегодовых суточных сумм осадков (*ER*) по данным трех климатических моделей и трех метеорологических станций за период 1970-2005 (м/с 30504, 30507), 1970-1996 (м/с 30604).

5.3.3. Выявление трендов климатических характеристик по данным климатических проекций на будущий период 2006-2098 согласно двум сценариям развития выбросов парниковых газов

Для выявления изменений на будущий период по данным климатических моделей также были рассчитаны климатические характеристики по формулам 1-6. Для выявления трендов использовался метод Манна-Кендалла с уровнем значимости $p < 0.05$ (Kendall, 1975; Mann, 1945), для оценки величины трендов применялся метод Тейла-Сена (Sen, 1968).

Годовая сумма осадков. Согласно сценарию RCP 2.6 статистически значимых трендов не отмечается. Согласно сценарию RCP 8.5 выявлены положительные статистически значимые тренды по данным всех моделей. Величина тренда составила 155, 125, 110 мм (20, 20, 15 %) соответственно для данных моделей NCC-NorESM1-M, MPI-M-MPI-ESM-LR, МОИС-HadGEM2-ES за весь рассматриваемый период (рисунок 26).

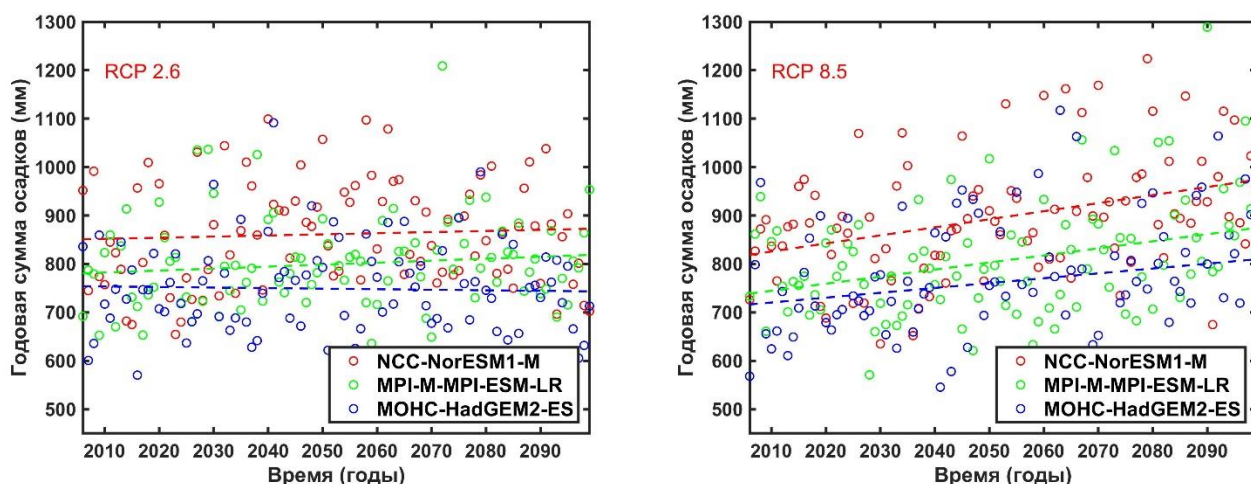


Рис. 26. Сравнение годовых сумм осадков по данным трех климатических моделей согласно двум сценариям выбросов парниковых газов для периода 2006-2098 гг.

Максимальные суточные осадки. Согласно сценарию RCP 2.6 статистически значимых трендов не отмечается. Согласно сценарию RCP 8.5 выявлены положительные статистически значимые тренды по данным всех моделей. Величина тренда составила 20, 10, 13 мм соответственно по данным моделей NCC-NorESM1-M, MPI-M-MPI-ESM-LR, МОИС-HadGEM2-ES за весь рассматриваемый период (рисунок 27). Также отмечено значительное увеличение суточных максимальных осадков относительно исторического периода по данным моделей, однако даже при RCP8.5 на всем временном промежутке не достигается наблюдаемая в 1984 году величина 140 мм.

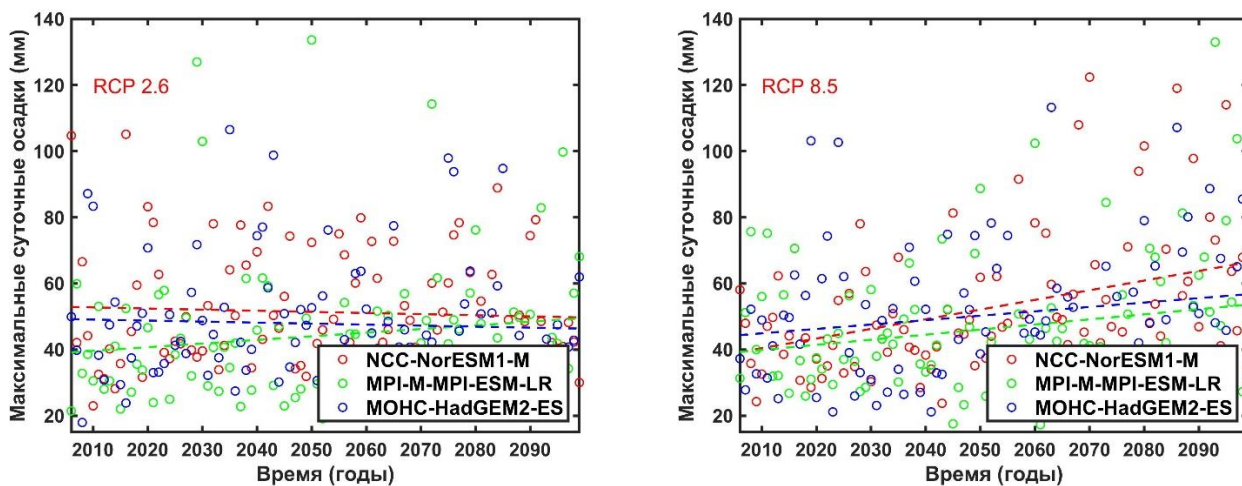


Рис. 27. Сравнение максимальных суточных осадков по данным трех климатических моделей согласно двум сценариям выбросов парниковых газов для периода 2006-2098 гг.

Максимальные суммы осадков за 5 дней. Согласно сценарию RCP 2.6 статистически значимых трендов не отмечается. Согласно сценарию RCP 8.5 выявлены положительные статистически значимые тренды по данным всех моделей. Величина тренда составила 40, 10, 25 мм соответственно по данным моделей NCC-NorESM1-M, MPI-M-MPI-ESM-LR, MOHC-HadGEM2-ES за весь рассматриваемый период (рисунок 28). Относительно исторического периода отмечено увеличение максимальных сумм пятидневных осадков как для данных моделей, так и для данных наблюдений.

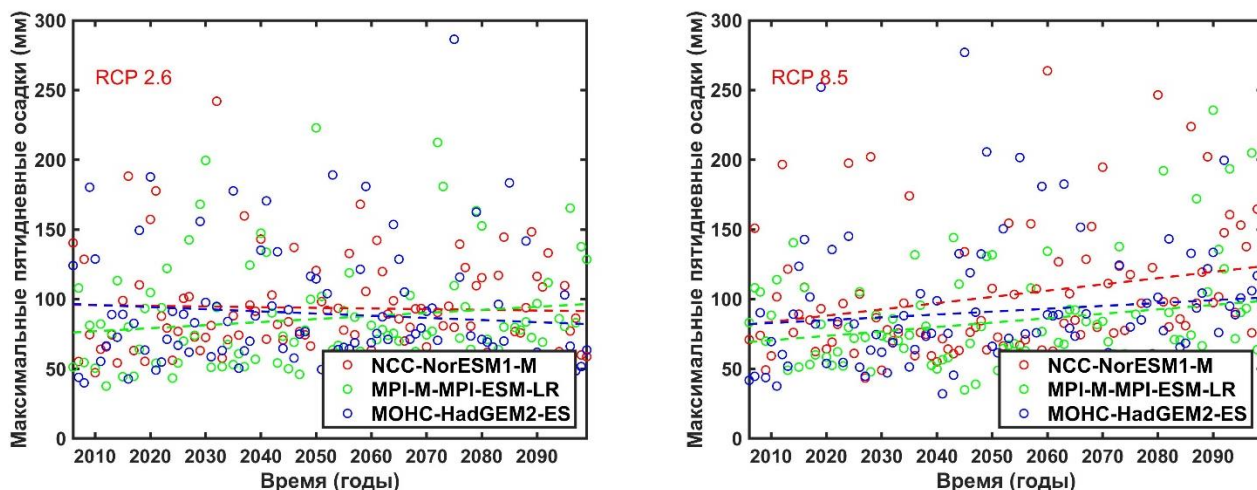


Рис. 28. Сравнение максимальных суточных осадков по данным трех климатических моделей согласно двум сценариям выбросов парниковых газов для периода 2006-2098 гг.

Доля интенсивных осадков в годовой сумме. Статистически значимый положительный тренд выявлен только для данных модели NCC-NorESM1-M при RCP8.5, величина которого составила 10% (рисунок 29).

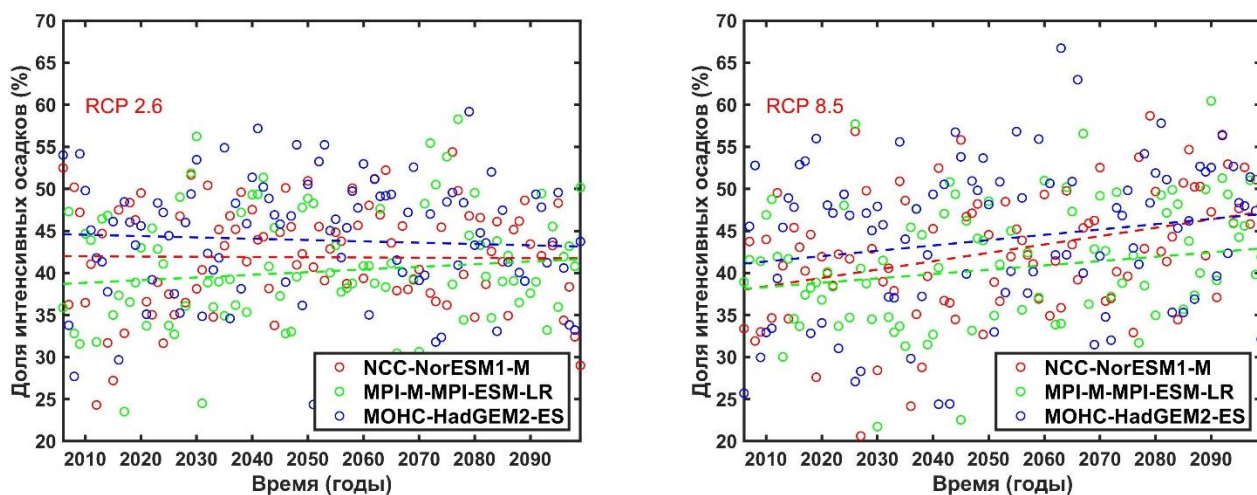


Рис. 29. Сравнение долей интенсивных осадков в годовой сумме по данным трех климатических моделей согласно двум сценариям выбросов парниковых газов для периода 2006-2098 гг.

Количество дней с осадками более 10 мм. Согласно сценарию RCP 2.6 статистически значимых трендов не выявлено. Согласно сценарию RCP 8.5 выявлены положительные статистически значимые тренды по данным моделей NCC-NorESM1-M, MPI-M-MPI-ESM-LR, по данным модели MOHC-HadGEM2-ES также отмечен положительный тренд, но с более низким уровнем значимости $p = 0.07$. Величина тренда составила 4, 3, 3.5 мм соответственно по данным моделей NCC-NorESM1-M, MPI-M-MPI-ESM-LR, MOHC-HadGEM2-ES за весь рассматриваемый период (рисунок 30). Однако относительно наблюдаемых величин на историческом периоде увеличения количества дней с осадками больше 10 мм не наблюдается.

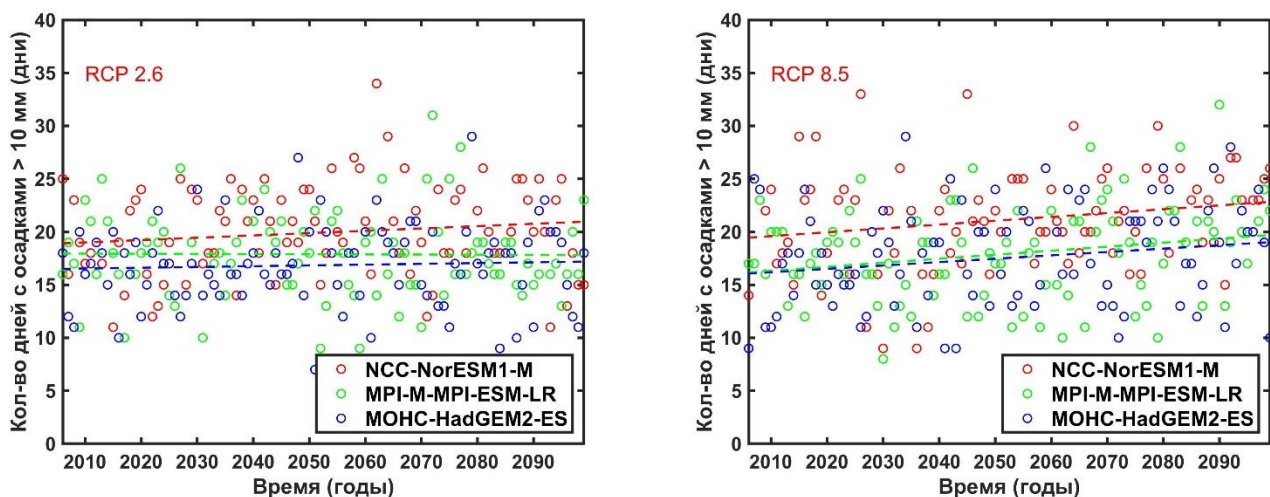


Рис. 30. Сравнение сумм дней с осадками не ниже 10 мм по данным трех климатических моделей согласно двум сценариям выбросов парниковых газов для периода 2006-2098 гг.

Согласно сценарию эмиссии парниковых газов RCP8.5 действительно наблюдается увеличение всех климатических характеристик по осадкам: увеличиваются годовые суммы, максимальные суточные и пятидневные осадки, также увеличивается и количество дней с осадками более 10 мм, растет доля интенсивных осадков. Согласно сценарию эмиссии парниковых газов RCP2.6 статистически значимых трендов не выявлено. Несмотря на увеличение всех характеристик для RCP8.5 в течение будущего периода, относительно данных наблюдений в историческом периоде не наблюдается изменений экстремальных характеристик. Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) при развитии атмосферы согласно сценарию RCP8.5 действительно возможно увеличение количества и интенсивности осадков в будущем относительно прошлого, если не принимать во внимание исторические экстремумы, не описываемые климатическими моделями; 2) никаких значимых изменений величины и интенсивности осадков не ожидается согласно сценарию RCP2.6; 3) наблюдаемые экстремумы как явление вероятностное предсказать невозможно, как и появление на свет «черного лебедя» (Taleb, 2007).

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ

Результирующим этапом работы является расчет характеристик речного стока с использованием данных климатических проекций и гидрологической модели. Для этого данные климатических моделей были подготовлены в качестве входных данных в гидрологическую модель определенного формата. Параметризация и верификация гидрологической модели выполнена на предыдущем этапе.

Расчет стока проведен для исторического периода (1970 – 2005 гг.) по данным трех климатических моделей. Для будущего периода (2006 – 2098) расчет выполнен для двух сценариев выбросов парниковых газов (RCP 2.6 и RCP8.5), называемых репрезентативными траекториями концентрации парниковых газов (Representative Concentration Pathways – RCP). По результатам расчета построены кривые вероятности превышения рассчитанных и наблюдаемых годовых максимальных расходов воды (рисунки 31 – 33) и хронологические графики рассчитанных и наблюдаемых максимальных годовых расходов воды (рисунки 34 – 39).

Рассчитанные значения максимального стока как для исторического периода, так и для будущего периода сравнивались с наблюдаемыми без учета паводка 2019 года. Для периода 1970-2005 отмечено следующее: наблюдаемый максимум 1984 года не был достигнут при использовании данных ни одной климатической модели. Модель NCC-NorESM1-M, несмотря на лучшее воспроизведение осадков в высокогорной части водосбора, также как и другие две не воспроизводит пиковых значений осадков, а растягивает их во времени. Это отражается в значительном превышении рассчитанной кривой вероятности максимальных значений над наблюдаемой. Кривая по данным модели MPI-M-MPI-ESM-LR имеет лучшую сходимость с наблюдаемыми в области обеспеченностей до 2% включительно (рисунок 31).

Расчет на будущий период проводился для двух путей развития концентрации парниковых газов в атмосфере: RCP2.6, отражающим постепенное повышение до 2040 года и постепенное уменьшение до текущего уровня до конца 21 века и RCP8.5, характеризующим постепенное увеличение в течение всего 21 века. Для обоих вариантов отмечается значительное превышение рассчитанных кривых по данным всех климатических проекций над наблюдаемой до вероятности превышения 2% (рисунки 28 – 29). Однако получены абсолютно противоположные результаты для вероятностей превышения менее 2%. Для RCP2.6 согласно данным модели NCC-NorESM1-M ($4027 \text{ м}^3/\text{с}$)

практически достигнут исторический максимум, наблюдавшийся в 1984 году (4040 м³/с), в то время как по данным других моделей рассчитанный максимум менее 3200 м³/с. Для RCP8.5 рассчитанные значения максимальных расходов воды составили 3977, 3892, 3228 м³/с по данным моделей МОНС-HadGEM2-ES, MPI-M-MPI-ESM-LR и NCC-NorESM1-M соответственно. Сравнимая величина с паводком 2019 года не была получена ни при одном варианте расчета.

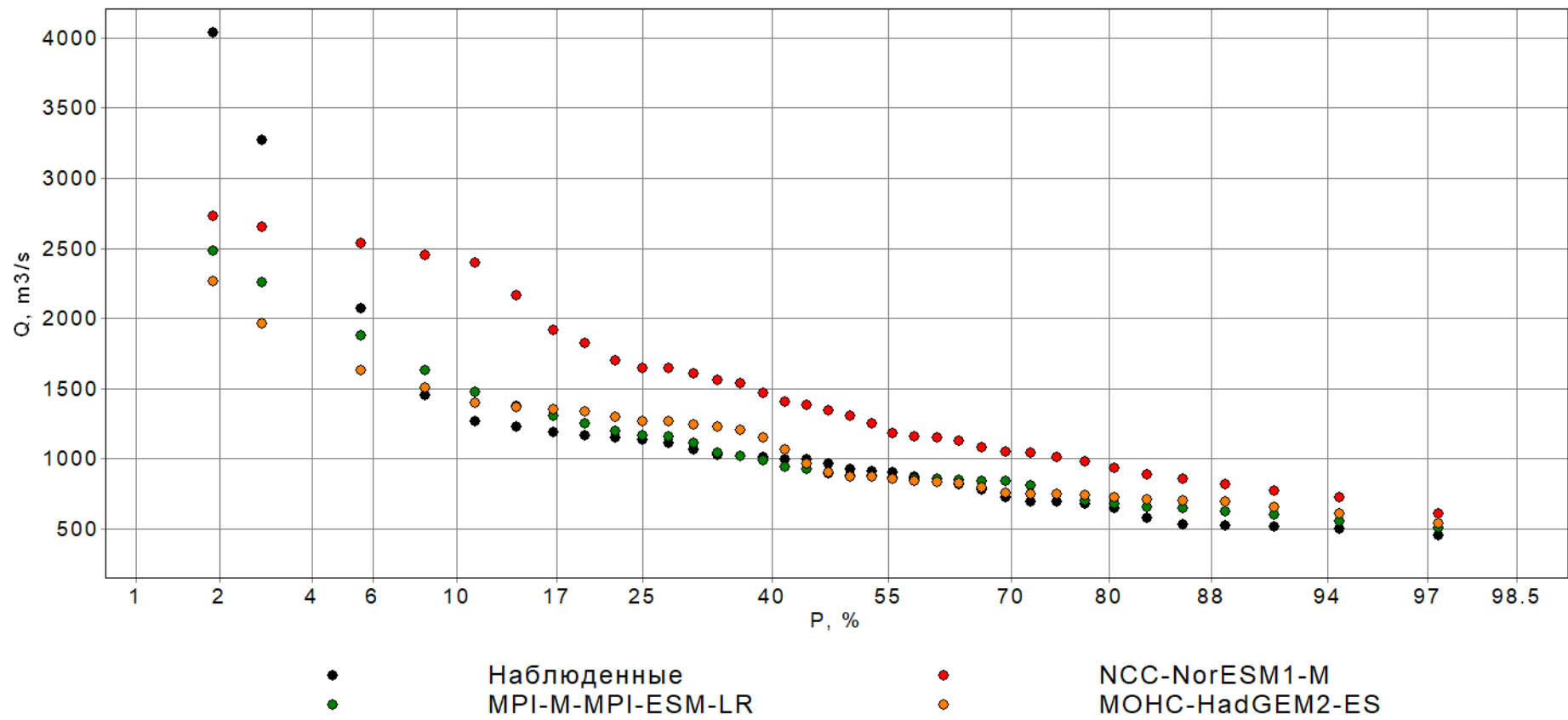


Рисунок 31. Кривые вероятности превышения рассчитанных максимальных расходов воды по данным климатических моделей для периода 1970 – 2005 и наблюдаемых (1970-2005).

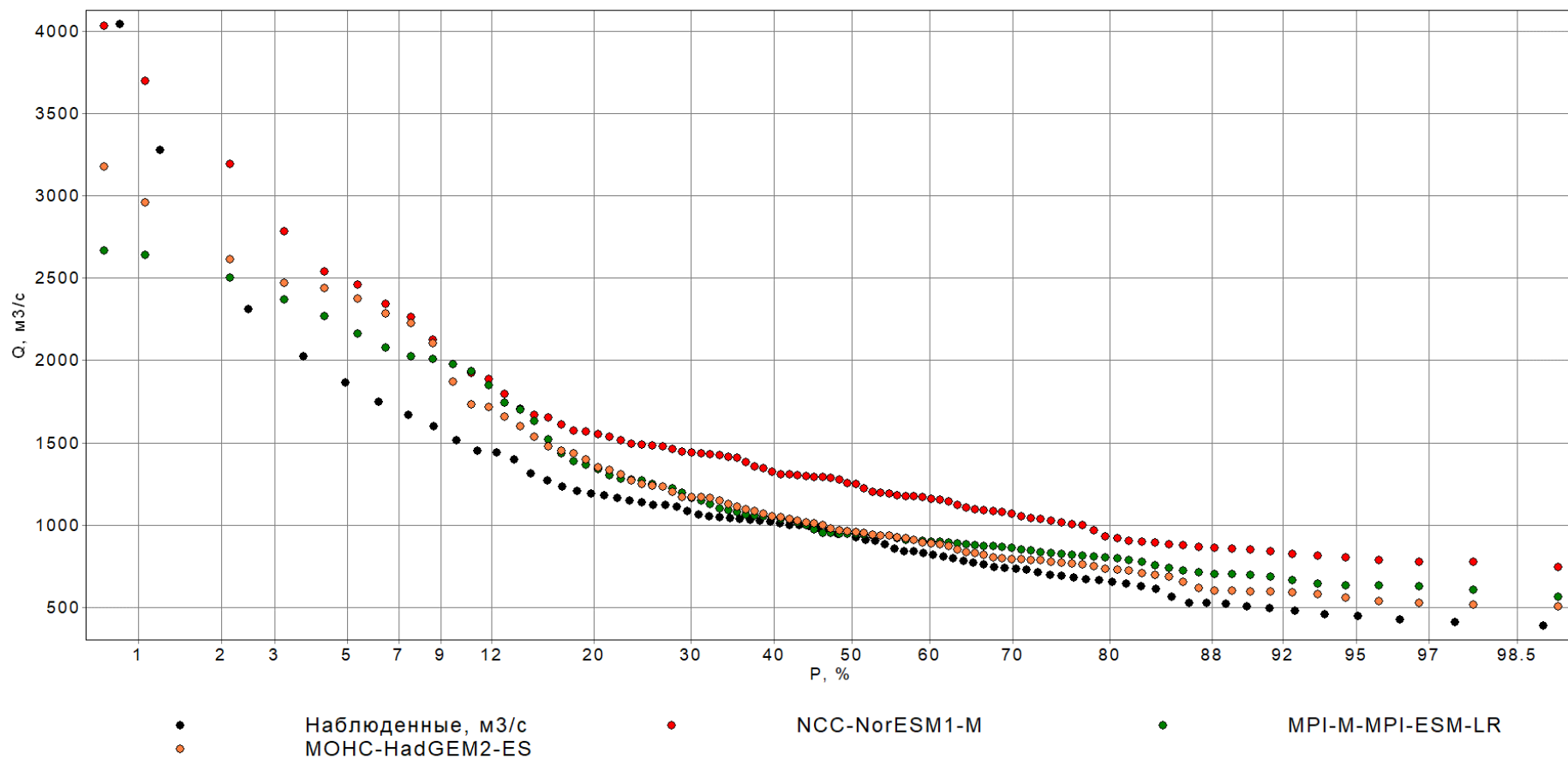


Рисунок 32. Кривые вероятности превышения рассчитанных максимальных расходов воды по данным климатических моделей для периода 2006 – 2098 (для $r_{ср2.6}$) и наблюдаемых за весь период наблюдений (1941 – 2017).

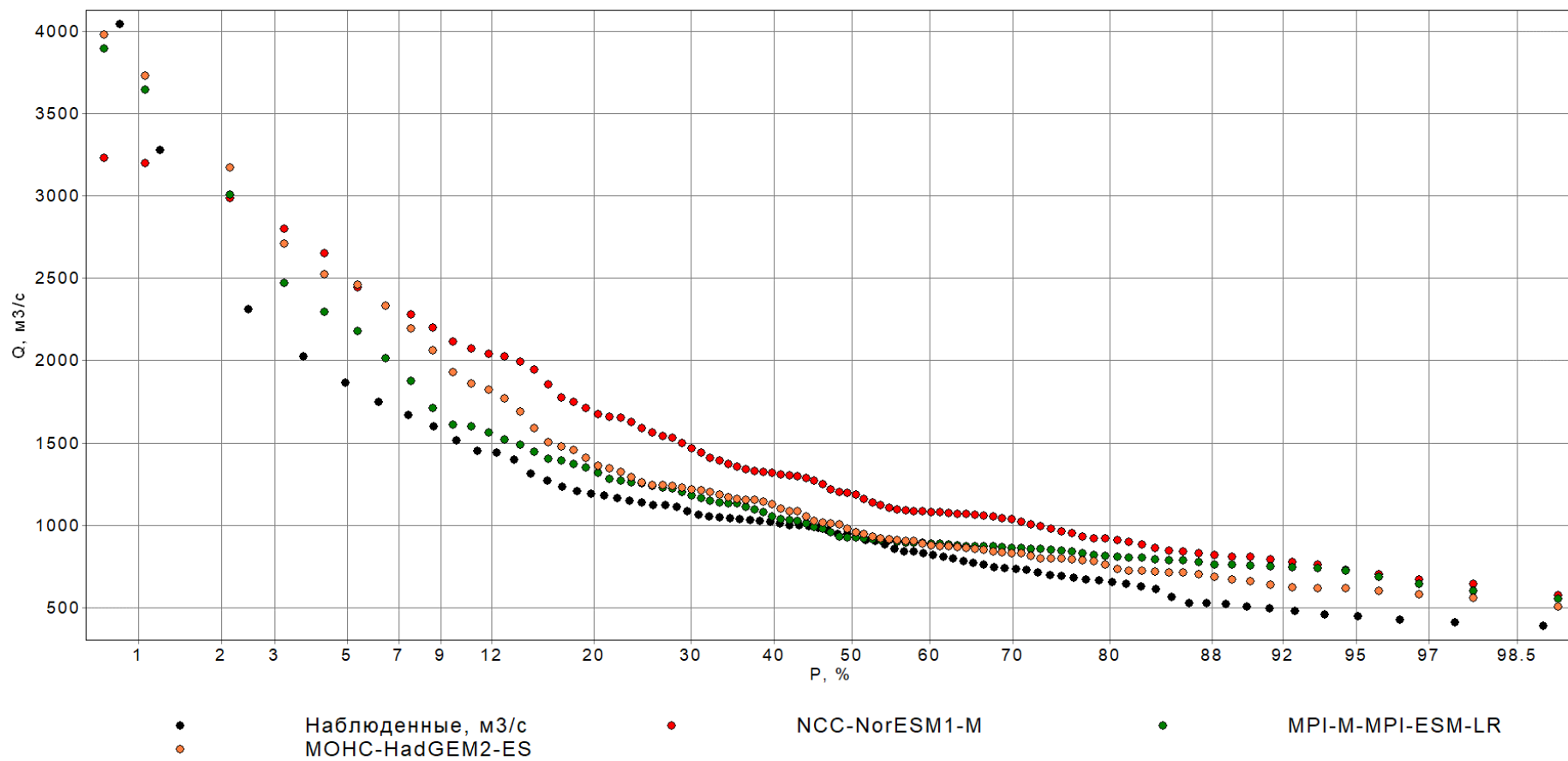


Рисунок 33. Кривые вероятности превышения рассчитанных максимальных расходов воды по данным климатических моделей для периода 2006 – 2098 (для RCP8.5) и наблюдаемых за весь период наблюдений (1941 – 2017).

Для оценки общей тенденции изменения максимальных характеристик стока проведена оценка трендов. Для выявления трендов использовался метод Манна-Кендалла с уровнем значимости $p < 0,05$ (Kendall, 1975; Mann, 1945). Обнаруженные тренды не являются статистически значимыми. Отсутствие статистической значимости в изменении гидрологических характеристик описано в работе (Dai, 2016). Для визуализации рассчитанных максимальных расходов воды на основе данных климатических моделей и данных наблюдений построены совмещенные графики 34 – 39. Согласно прогнозу RCP2.6 возможно увеличение частоты максимальных расходов величин 2000-3000 м³/с как относительно данных наблюдений, так и относительно рассчитанных характеристик на исторический период. Об увеличении экстремумов, согласно этим данным, нельзя сделать однозначное заключение ввиду сглаживания климатическими моделями полей осадков как по времени, так и в пространстве. Согласно проекции RCP8.5 возможно увеличение частоты максимальных расходов величин 2500 – 4000 м³/с.

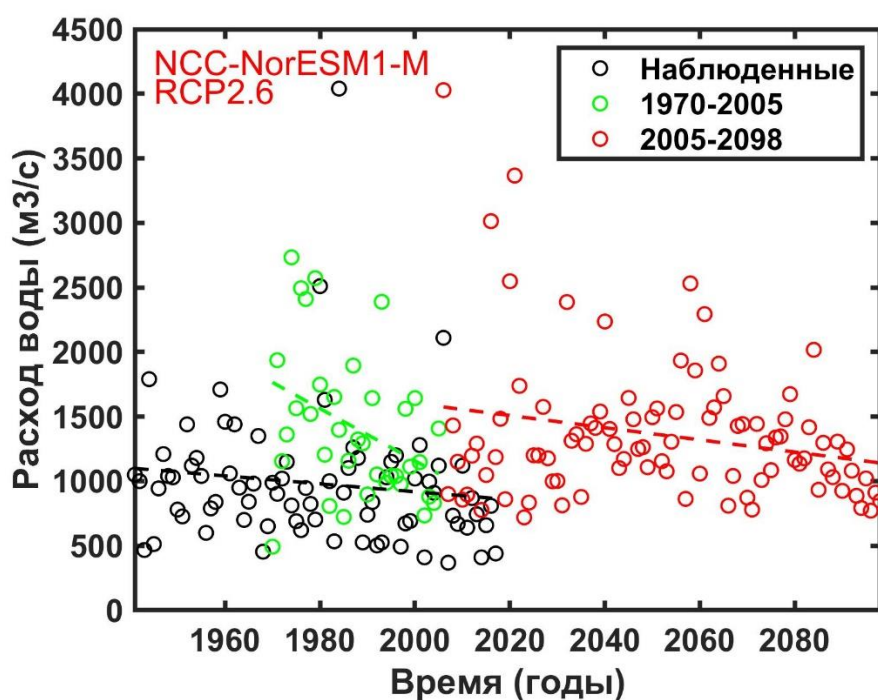


Рис.34. Совмещенные графики наблюдаемых, рассчитанных на основе данных климатических моделей для исторического периода и для будущего согласно проекции RCP2.6 модели NCC-NorESM1-M.

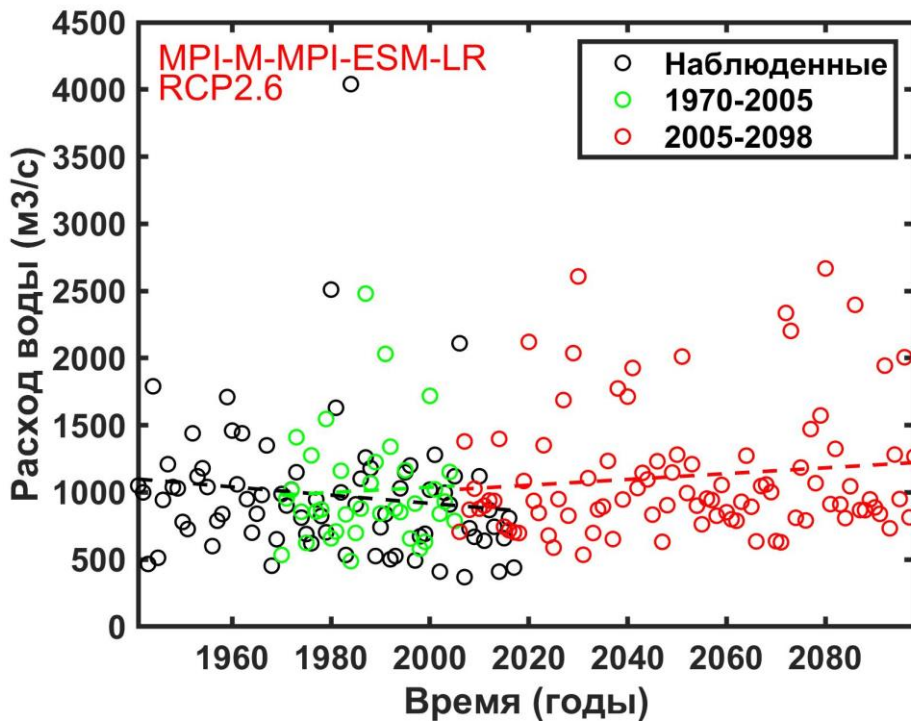


Рис.35. Совмещенные графики наблюдаемых, рассчитанных на основе данных климатических моделей для исторического периода и для будущего согласно проекции RCP2.6 модели MPI-M-MPI-ESM-LR.

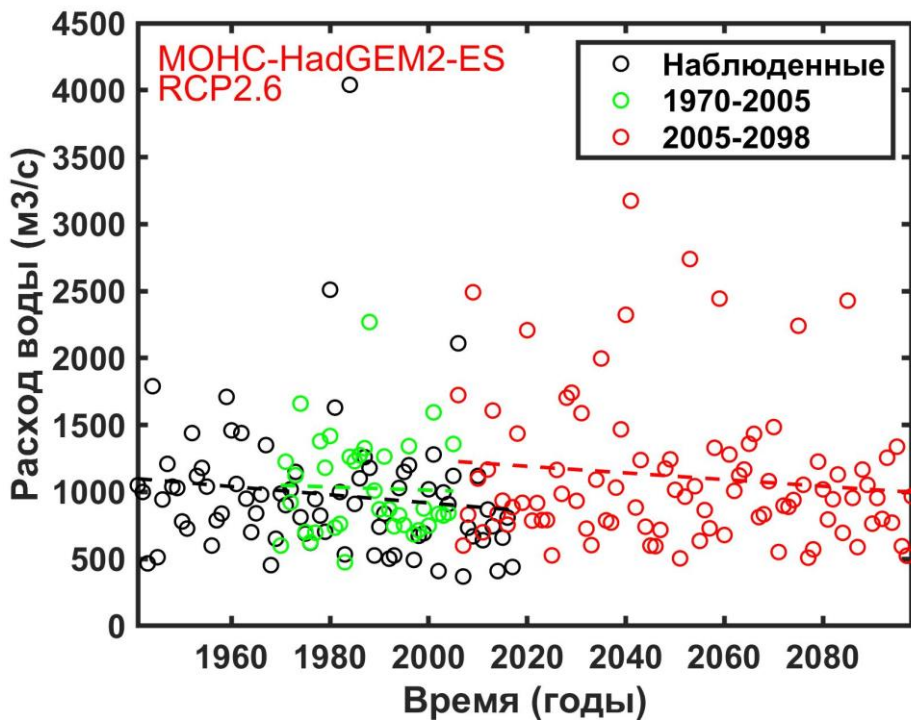


Рис.36. Совмещенные графики наблюдаемых, рассчитанных на основе данных климатических моделей для исторического периода и для будущего согласно проекции RCP2.6 модели MOHC-HadGEM2-ES.

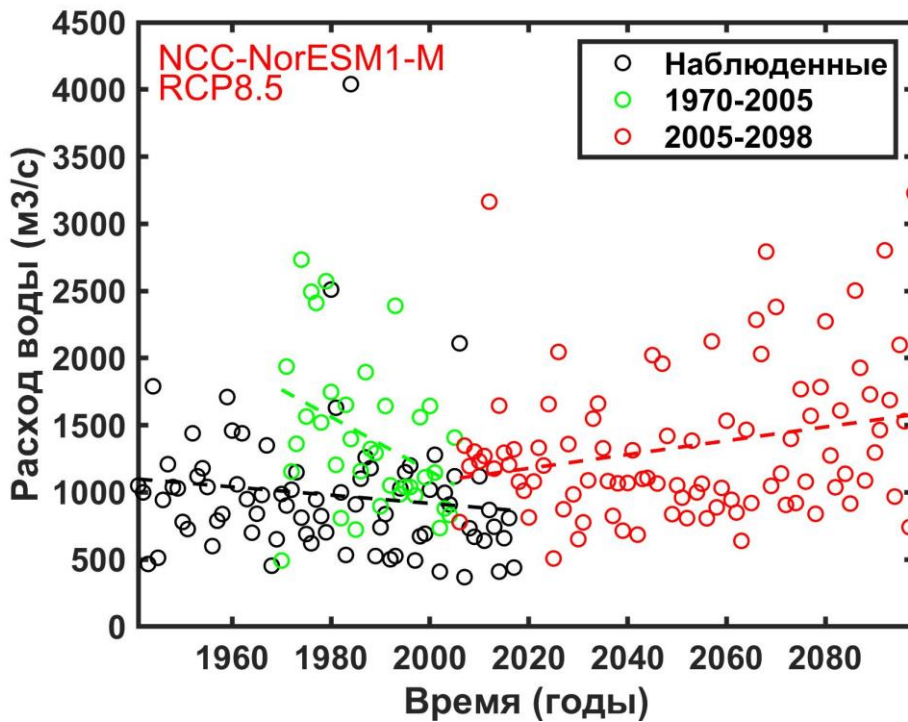


Рис.37. Совмещенные графики наблюдаемых, рассчитанных на основе данных климатических моделей для исторического периода и для будущего согласно проекции RCP8.5 модели NCC-NorESM1-M.

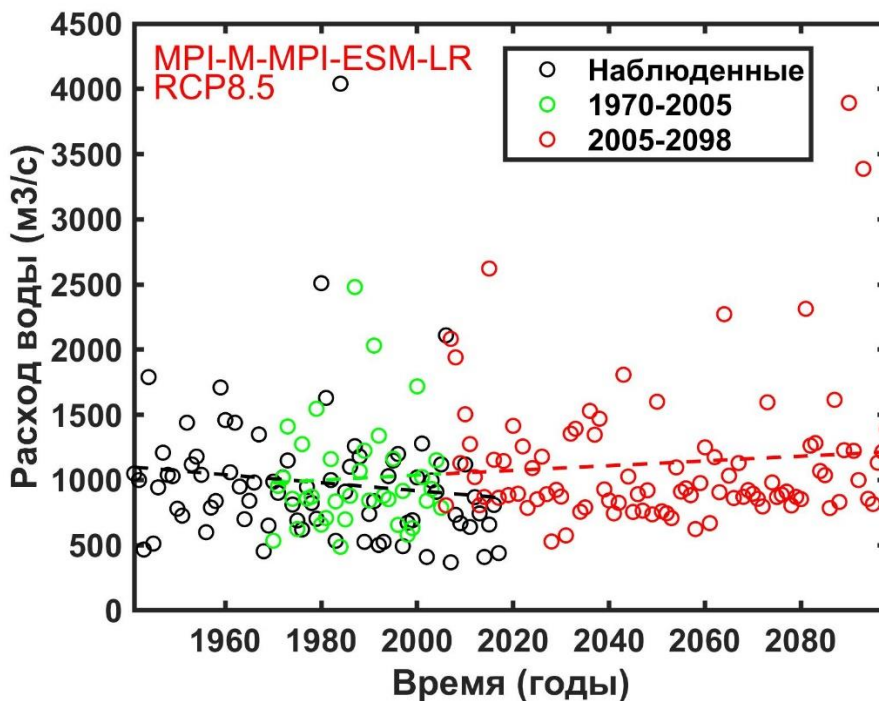


Рис.38. Совмещенные графики наблюдаемых, рассчитанных на основе данных климатических моделей для исторического периода и для будущего согласно проекции RCP8.5 модели MPI-M-MPI-ESM-LR.

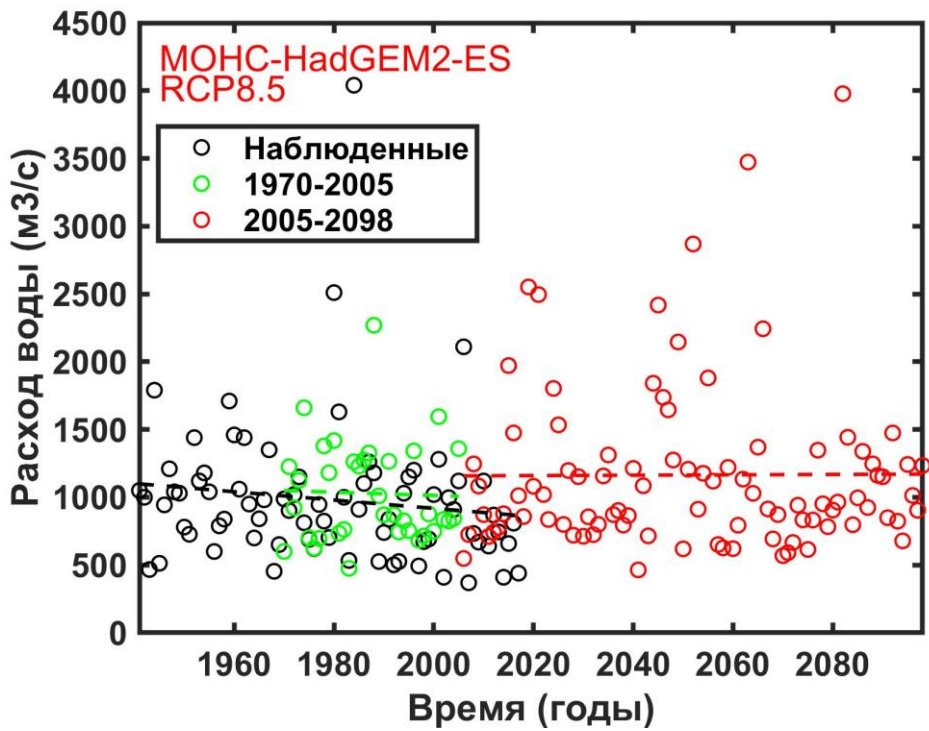


Рис.39. Совмещенные графики наблюдаемых, рассчитанных на основе данных климатических моделей для исторического периода и для будущего согласно проекции RCP8.5 модели МОHC-HadGEM2-ES.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экстремальные осадки, несомненно, вызывают серьезную проблему для инфраструктуры и населения населенных пунктов, расположенных в зонах повышенной опасности паводковых наводнений. Из-за страшных последствий паводка в июне 2019 года в городе Тулун возникает ряд вопросов: можно ли было предсказать паводок; что стало основной причиной этого события; будут ли повторяться в будущем события подобного масштаба. Для ответа на эти вопросы в рамках настоящей работы были решены следующие задачи:

- 1) Собрана и обобщена гидрометеорологическая информация по району исследования. Установлено, что количество осадков на станции Белозиминская (единственная высокогорная станция водосбора р. Ия, которая в 1996 году была закрыта) значительно превосходит осадки на действующих станциях Икей и Тулун, а основная стокоформирующая часть водосбора уже более 20 лет является полностью неосвещенной данными наблюдений за осадками.
- 2) Выполнена схематизация водосбора р. Ия и систематизированы параметры распределенной детерминированной гидрологической модели «Гидрограф» для трех основных ландшафтов. Проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока трех водосборов в бассейне р. Ия с суточным шагом за период с 1970 по 1996 гг. Получены суточные гидрографы стока и распределение элементов водного баланса. Ошибка моделирования среднесуточной величины годового стока не превышает 7%. Медианное значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа при моделировании с расчетным шагом сутки составляет в среднем 0,69 для периода продолжительностью 26 лет, что позволило оценить полученные результаты как удовлетворительные.
- 3) Проведен расчет и оценка характеристик паводков в июне 2019 г. на р. Ия. Для расчетов использовались данные наблюдений двух метеорологических станций Икей и Тулун. Интерполяция осадков при моделировании на водосборе производилась с учетом распределения осадков по высоте. Рассчитанный слой стока при формировании первого паводка за период с 25 июня по 5 июля 2019 г. составил 162 мм. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг значения 6570 м³/с.
- 4) Проведен анализ метеорологических условий формирования паводка на р. Ия – г. Тулун в июне 2019 г. с использованием глобальной модели прогноза погоды ICON. Выявлено, что в ситуации июня 2019 г. модель ICON спрогнозировала более раннее выпадение значительных сумм осадков, чем фактически наблюдалось на

метеорологических станциях, однако удовлетворительно предсказала общую сумму осадков, которая отличается от наблюдаемых величин не более чем на 7%.

- 5) Выполнена оценка характеристик паводка 2019 года на основе данных модели погоды ICON. Максимальный рассчитанный 3-часовой расход составил 5260 м³/с. При сравнении рассчитанных гидрографов стока на основе данных модели ICON и метеостанций выявлено, что по данным метеостанций максимальный расход превысил прогноз по модели ICON на 1800 м³/с (слой стока превысил на 26 мм), что связано с разным временным распределением осадков во время паводка.
- 6) Проведен анализ данных климатических моделей на исторический период. Рассчитаны климатические характеристики, отражающие климатические условия рассматриваемого года. Построены кривые вероятности превышения климатических характеристик. Получено, что модель NCC-NorESM1-M завышает общее количество осадков до 20% для равнинной местности, но лучше воспроизводит осадки для горной. Также отмечено, что суточные экстремумы, являющиеся основной причиной формирования паводочных наводнений, плохо воспроизводят все модели. Однако по характеристикам, отражающим внутригодовое распределение осадков и их количества (сумма осадков не менее 10 мм и годовая интенсивность осадков) данным наблюдений лучше соответствуют данные модели NCC-NorESM1-M. Доля интенсивных осадков в годовой сумме преимущественно занижается всеми климатическими моделями.
- 7) Для данных климатических проекций на будущий период рассчитаны климатические характеристики и проведен анализ на наличие трендов. Показано, что согласно сценарию эмиссии парниковых газов RCP8.5 наблюдается увеличение всех климатических характеристик по осадкам. Согласно сценарию эмиссии парниковых газов RCP2.6 статистически значимых трендов не выявлено. Несмотря на увеличение всех характеристик для RCP8.5 в течение будущего периода, относительно данных наблюдений в историческом периоде не наблюдается изменений экстремальных характеристик. Сформулированы три заключения: 1) при развитии атмосферы согласно сценарию RCP8.5 действительно возможно увеличение количества и интенсивности осадков в будущем относительно прошлого, если не принимать во внимание исторические экстремумы, не улавливаемые климатическими моделями; 2) никаких значимых изменений величины и интенсивности осадков не ожидается согласно сценарию RCP2.6; 3) наблюдаемые экстремумы как явление вероятностное предсказать невозможно, как и появление на свет «черного лебедя».

8) Выполнен расчет гидрологических характеристик на основе данных климатических проекций. Для оценки общей тенденции изменения максимальных характеристик стока проведена оценка трендов. Обнаруженные тренды не являются статистически значимыми. Сделан вывод, что согласно прогнозу RCP2.6 возможно увеличение частоты максимальных расходов величин 2000-3000 м³/с как относительно данных наблюдений, так и относительно рассчитанных характеристик на исторический период. Согласно проекции RCP8.5 возможно увеличение частоты максимальных расходов величин 2500 – 4000 м³/с. Об увеличении экстремумов малых повторяемостей, согласно этим данным, нельзя сделать однозначное заключение ввиду сглаживания климатическими моделями полей осадков по времени.

Все задачи, поставленные в настоящей выпускной квалификационной работе выполнены, а поставленная цель достигнута.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

- Макарьева О.М., Нестерова Н.Н., **Федорова А.Д.**, Шихов А.Н., Виноградова Т.А. Моделирование разрушительных паводков летом 2019 г. на реке Ие (Иркутская область) // ГЕОГРАФИЯ И ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2020. № 4 с. 66–76. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-4\(66-76\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(66-76)).
- **Fedorova, A.**, Nesterova, N., Makarieva, O., and Shikhov, A.: May long-term historical hydrological data be misleading for flood frequency analysis in current conditions of climate change?, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-1140, 2019 <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-1140>.
- **Fedorova A.**, Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A., Vinogradova T. Modelling maximum discharge of the catastrophic flood at the Iya River (Irkutsk region, Russia) in 2019. E3S Web Conf. Volume 163, 2020 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016301004>.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Монографии:

Платонова Т.В., 2008. Климатические изменения температуры воздуха и атмосферных осадков во второй половине 20 века на территории Российской Федерации. Дис. ... канд. геогр. наук. ГУ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН.

Dai, A. 2016. Historical and Future Changes in Streamflow and Continental Runoff. Geophysical Monograph Series, 17–37. doi:10.1002/9781118971772.ch2

Holmes, J. D. 2015. Wind loading of structures. CRC Press.

Kendall M. G. 1975. Rank Correlation Methods – Griffin, London.

Mann H. B. 1945. Nonparametric tests against trend – *Econometrica*, 13, p. 245–259.

Sen P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau – *Journal of the American Statistical Association*, 63, p. 1379–1389.

Taleb, N.N. 2007. The black swan: the impact of the highly improbable. London: Penguin.

Статьи в журналах:

Кичигина Н.В. Опасность наводнений на реках Байкальского региона // *География и природ. ресурсы*. — 2018. — № 2. — С. 41–51.

Кокорев В.А., Анисимов О.А. (2013). Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. Т. 25. С. 131–153,

Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А., 2015. Расчет глубины сезонно-талого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции в задаче гидрологического моделирования (Часть 2). *Криосфера Земли*. Том 19, № 2, с. 35–44.

Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. 2020. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции). *Криосфера Земли*, №1, (принята в печать).

Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Виноградова Т.А., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д., 2019б. Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф». Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, Том 64, No 1, с. 24–43, <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.102>.

Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Федорова А.Д., Шихов А.Н., Виноградова Т.А. 2020а. Моделирование разрушительных паводков летом 2019 г. на реке Ие (Иркутская область). География и природные ресурсы. № 4, с. 66-76.

Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Ямпольский Г.П., Кудымова Е.Ю., Остапов А.А., Колупаева А.Д., 2019а. Оценка максимальных расходов воды различной обеспеченности неизученной горной реки Хемчик (республика Тыва) на основе методов математического моделирования. Инженерные изыскания. Том 13, № 2, с. 36-51. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-2-36-51>.

Яровая Д.А., Посошков В.Л. Параметры атмосферных осадков в Азово-Черноморском регионе на основе модельных и натурных данных // Морской гидрофизический журнал. – 2017. – № 1. – С. 11 – 26.

Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A., & Rummukainen, M. (2001). Climate change impacts on runoff in Sweden-assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*, 16, 101–112. doi:10.3354/cr016101

Chiew, F. H. S., Potter, N. J., Vaze, J., Petheram, C., Zhang, L., Teng, J., & Post, D. A. (2013). Observed hydrologic non-stationarity in far south-eastern Australia: implications for modelling and prediction. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(1), 3–15. doi:10.1007/s00477-013-0755-5

Christensen, J. H., Boberg, F., Christensen, O. B., & Lucas-Picher, P. (2008). On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35(20). doi:10.1029/2008gl035694

Do, H. X., Westra, S., & Leonard, M. (2017). A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow. *Journal of Hydrology*, 552, 28–43. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.06.015

E. Cheynet (2021). Short introduction to the Generalized Extreme Values (GEV) distribution (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60962-short-introduction-to-the->

generalized-extreme-values-gev-distribution), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 16, 2021.

Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007b). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547–1578. doi:10.1002/joc.1556

Fowler, H. J., Ekström, M., Blenkinsop, S., & Smith, A. P. (2007a). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *Journal of Geophysical Research*, 112(D18). doi:10.1029/2007jd008619

Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8). doi:10.1029/2006gl025734

Gudmundsson, L., Seneviratne, S. I., & Zhang, X. (2017). Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources. *Nature Climate Change*, 7(11), 813–816. doi:10.1038/nclimate3416

Kundzewicz, Z. W., Luger, N., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Döll, P., Pińskwar, I., ... Matczak, P. (2010). Assessing river flood risk and adaptation in Europe—review of projections for the future. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(7), 641–656. doi:10.1007/s11027-010-9213-6

Lebedeva L.S., Semenova O.M., Vinogradova T.A, 2015. Calculations of seasonal thawing depth in different landscapes of the Kolyma water-balance station by means of hydrological model “Hydrograph” (Part 2). *Earth cryosphere*. Vol. 19, No. 2, pp. 35-44.

Meredith, E., Semenov, V., Maraun, D. et al. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geosci* 8, 615–619 (2015). <https://doi.org/10.1038/ngeo2483>

Mujere, N., & Eslamian, S. (2014). Climate Change Impacts on Hydrology and Water Resources. *Handbook of Engineering Hydrology*, 113–126. doi:10.1201/b16683-8

Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282–290.

Salathé, E. P. (2003). Comparison of various precipitation downscaling methods for the simulation of streamflow in a rainshadow river basin. *International Journal of Climatology*, 23(8), 887–901. doi:10.1002/joc.922

Semenova O.M., Lebedeva L.S., Volkova N.V., Shalina E.V., 2015. Using satellite data to study the processes of runoff formation in the river basin Vitimkan (permafrost distribution zone). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. No. 3, pp. 15-26.

Semenova O.M., Lebedeva L.S., Volkova N.V., Shalina E.V., 2015. Using satellite data to study the processes of runoff formation in the river basin Vitimkan (permafrost distribution zone). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. No. 3, pp. 15-26.

Semenova, O., Lebedeva, L., & Vinogradov, Y. (2013). Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia. *Hydrogeology Journal*, 21(1), 107–119. doi:10.1007/s10040-012-0936-1

Shiklomanov, A. I., Lammers, R. B., Lettenmaier, D. P., Polischuk, Y. M., Savichev, O. G., Smith, L. C., & Chernokulsky, A. V. (2012). Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*, 111–154. doi:10.1007/978-94-007-4569-8_4

Shiklomanov, A. I., Lammers, R. B., Rawlins, M. A., Smith, L. C., & Pavelsky, T. M. (2007). Temporal and spatial variations in maximum river discharge from a new Russian data set. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G4), n/a–n/a. doi:10.1029/2006jg000352

Shiklomanov, N. I., Streletskiy, D. A., Swales, T. B., & Kokorev, V. A. (2016). Climate Change and Stability of Urban Infrastructure in Russian Permafrost Regions: Prognostic Assessment based on GCM Climate Projections. *Geographical Review*, 107(1), 125–142. doi:10.1111/gere.12214

Shkolnik, I., Pavlova, T., Efimov, S., & Zhuravlev, S. (2017). Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario. *Climate Dynamics*, 50(1-2), 215–230. doi:10.1007/s00382-017-3600-6

Stevens, A. J., Clarke, D., & Nicholls, R. J. (2016). Trends in reported flooding in the UK: 1884–2013. *Hydrological Sciences Journal*, 61(1), 50–63. doi:10.1080/02626667.2014.950581

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485–498. doi:10.1175/bams-d-11-00094.1

Teutschbein, C., & Seibert, J. (2010). Regional Climate Models for Hydrological Impact Studies at the Catchment Scale: A Review of Recent Modeling Strategies. *Geography Compass*, 4(7), 834–860. doi:10.1111/j.1749-8198.2010.00357.x

Veijalainen, N., Lotsari, E., Alho, P., Vehviläinen, B., & Käyhkö, J. (2010). National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology*, 391(3-4), 333–350. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.035

Vinogradov, Y. B., Semenova, O. M., & Vinogradova, T. A. (2010). An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. *Hydrological Processes*, 25(7), 1055–1073. doi:10.1002/hyp.7901

Vormoor, K., Lawrence, D., Heistermann, M., & Bronstert, A. (2015). Climate change impacts on the seasonality and generation processes of floods – projections and uncertainties for catchments with mixed snowmelt/rainfall regimes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 913–931. doi:10.5194/hess-19-913-2015

Zängl G., Reinert D., Rípodas P., Baldauf M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society*. — 2015. — N 141 (687). — C. 563–579.

Фондовые материалы:

Агрогидрологические свойства почв Иркутской области (справочник). 1968. Иркутск. 549 с.

Виноградов, Ю. Б., Виноградова, Т. А., Математическое моделирование в гидрологии. Академия, Москва, 2010, 544 с.

Воробьев, Ю. Л., Акимов, В. А., Соколов, Ю. И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. Изд-во ООО «ДЭКС-ПРЕСС», Москва, 2003, 352 с.

Колтерманн, К.П., Добролюбов, С.А., Алексеевский, Н.И. Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей // Изд-во Триумф, Москва, 2012. 92 с.

Ландшафтная карта СССР 1980 года. М-б 1:2 500 000 / Отв. ред. И.С. Гудилин. — М: Изд-во Мин. геол. СССР, Гидроспецгеологии, 1980. — 16 л.

Материалы наблюдений опорных станций комплексной воднобалансовой и агрометеорологической сети, почвенноиспарительных и снегоиспарительных пунктов. Новосибирск.

Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. // Донской издательский дом, Ростов-на-Дону, 2012.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 16. Выпуск 2. Ангаро-Енисейский район. Ангара. Гидрометеиздат. Ленинград. 1972.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619084. Комплексная программа распределенной гидрологической модели «Гидрограф», правообладатель О.М. Макарьева, дата регистрации 30.07.2018.

Houghton, J.T., Jenkins, G.J., and Ephraums, J.J. (eds.) 1990. Climate Change. The IPCC Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.).

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Ресурсы сети Интернет:

<http://koldunov.net/?p=401>

<http://meteo.ru/>

<http://tulunr.irkobl.ru/about/index.php>

<http://www.cecilia-eu.org/>

<http://www.clavier-eu.org/>

<http://www.clivar.org/>

<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>

<https://cordex.org>

<https://ria.ru>

<https://water-rf.ru>