



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская работа)

На тему Вероятностные производственные функции
водозависимых отраслей экономики с учетом изменений
климата

Исполнитель Тихонова Александра Михайловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Зав. кафедрой инженерной гидрологии, к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

К.Т.Н. ДОЦЕНТ
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«26» мая 2025г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
1 Краткая физико-географическая характеристика района	9
1.1 Местоположение	9
1.2 Гидрологическая изученность	10
1.3 Рельеф, геологическое строение	14
1.4 Почвы	16
1.5 Климатическая характеристика	17
1.6 Растительность	18
1.7 Хозяйственная деятельность	19
2 Глобальные климатических моделей МГЭИК	21
2.1 Описание глобальных климатических моделей МГЭИК	21
2.2 Анализ глобальных климатических моделей МГЭИК	28
2.3 Анализ ретроспективных данных глобальных климатических моделей	29
2.4 Обработка климатических данных с использованием языка программирования Python	33
3 Существующие методы расчета характеристик годового стока	44
3.1 Статистические методы	44
3.2 Балансовые модели	46
3.3 Динамические модели	47
4 Анализ гидрометеорологических данных	53
4.1 Проверка рядов на однородность и значимость	53
4.2 Оценка значимости линейного тренда	55
4.3 Анализ корреляции слоя стока с суммой осадков	57
5 Расчет статистических характеристик многолетнего стока на ретроспективном материале	60
5.1 Исходные данные	60

5.2	Расчет по модели формирования многолетнего стока	64
5.2.1	Расчет при постоянных параметрах модели	66
5.2.2	Расчет при переменных параметрах модели	68
5.3	Вывод	88
6	Вероятностная оценка экономической эффективности расчетов статистических характеристик многолетнего стока в сельском хозяйстве	90
6.1	Формулировка задачи	90
6.2	Планирование социально-экономического развития субъекта РФ (на примере Западной Сибири)	91
6.3	Методы построения производственных функций	95
6.4	Проведение и анализ вероятностного расчета	103
6.5	Вывод	112
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
	Список использованных источников	116
	Приложение А – Листинг программы для распаковки данных глобальных климатических моделей МГЭИК (осадки)	121
	Приложение Б – Листинг программы для распаковки данных глобальных климатических моделей МГЭИК (температура)	126
	Приложение В – Листинг программы для прогноза стока рек	
	Приложение Г – Листинг программы для расчета ординат кривой обеспеченности Пирсона III	136
	Приложение Д – Листинг программы для построения кривых обеспеченности	143
	Приложение Е – Листинг программы для вероятностного расчета производственной функции на примере сельского хозяйства на территории Западной Сибири	145

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки влияния изменения климата на функционирование экономики, в частности водозависимых предприятий является одной из самых важных для научного сообщества. Вопросами климатических изменений занимается межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) [20], предлагая различные сценарии развития.

Одним из производств, зависящих от природных ресурсов, является сельское хозяйство. Развитие аграрной промышленности в Западной Сибири является одним из приоритетных направлений социально-экономического развития региона. Сейчас определены основные задачи и направления его развития. Основная задача – увеличение количества выращиваемых культур.

Для достижения этих целей реализуются различные программы и проекты, направленные на модернизацию сельского хозяйства, увеличение посевных полей и выращиваемых культур. В рамках этих программ проводятся мероприятия по повышению эффективности использования земельных ресурсов, внедрению новых технологий.

Актуальность темы заключается в том, что климатические изменения приводят к увеличению неопределенности в прогнозах гидрологического режима. Из-за этого возникают дополнительные риски для отраслей экономики, зависящих от водных ресурсов. Для минимизации ущерба необходимо разработать новые методы моделирования производственных функций для водозависимых производств, включающие вероятностную оценку.

Существует множество исследований по оценке климатических факторов, особенно активно данный вопрос изучается иностранными учеными. Однако большинство моделей основываются на детерминированных параметрах и не учитывают стохастичность. Также есть модели для анализа чувствительности производства к изменению погодных условий, разработанные зарубежными, однако они не позволяют оценивать

долгосрочные климатические изменения. Российские ученые Макоско А.А. и Матешева А.В. предложили методику экспресс-оценки климатического риска при социально-экономическом планировании [4]. Она основана на ретроспективных метеорологических наблюдениях и не предполагает оценку будущих изменений.

Цель работы – проведение вероятностного расчета производственных функций для водозависимых производств в условиях изменяющегося климата.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

А) Проанализировать краткие физико-климатические характеристики водосборов рек Ишим и Омь;

Б) Провести анализ доступных научных исследований, рассматривающих проблемы производственного планирования водозависимых производств, в условиях изменяющегося климата;

В) Подготовить исходные гидрометеорологические данные за ретроспективный период;

Г) Провести ретроспективный анализ моделей сценариев 6-го оценочного доклада МГЭИК;

Д) Подготовить метеорологические данные глобальных климатических моделей;

Е) Провести расчет многолетних гидрологических характеристик;

Ж) Провести сравнительный анализ прогнозных и фактических данных;

З) Разработать алгоритм вероятностной оценки показателей производительности водозависимого производства с учетом изменения климатических характеристик;

И) Провести вероятностный расчет производственных функций для сельского хозяйства.

Предметом исследования является режим многолетнего стока рек.

Объектом исследования является бассейны рек Ишим и Омь.

Научная новизна заключается в разработке методики вероятностного анализа производственной функции водозависимых производств, позволяющей оценивать степень риска возникновения ущерба вследствие недостатка водных ресурсов. Предложенный подход позволяет оптимизировать производственные процессы и адаптировать к меняющемуся гидрологическому режиму.

Практическая значимость работы: разработанная методика позволила определить потенциальные риски для сельскохозяйственных производств, вызванные глобальными климатическими изменениями. Проведенный вероятностный анализ является основным инструментом при принятии обоснованных решений в социально-экономическом планировании. Кроме того, полученные выводы позволяют снизить ущерб, вызванный уменьшением объема воды доступного для полива, и адаптироваться к климатическим изменениям. Разработанная методика вероятностного анализа производственных функций может быть применима не только к сельскому хозяйству, но и к любым другим водозависимым отраслям экономики. Что обеспечивает возможность адаптации региональных планов социально-экономического развития к возможным глобальным климатическим изменениям.

Апробация работы. Основные положения и результаты магистерской диссертации были представлены на следующих научных конференциях: VI Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» (Иркутск, 2023), Международная научно-практическая конференция по инженерной гидрологии «ИнжГидро-2025» (Санкт-Петербург, 2025), Межрегиональная молодежная научно-практическая конференция «Моря и воды суши в теории и практике» (Санкт-Петербург, 2025).

По теме диссертации опубликовано 4 статьи:

- Тихонова А.М., Гайдукова Е.В. Вклад природных ресурсов в производственные функции при изменении климата / Всероссийская

- научно-практическая конференция им. Жореса Алфёрова: сборник тезисов статей. – Санкт-Петербург: «Директ-Медиа», 2023. – С. 77–78.
- Тихонова А.М., Гайдукова Е.В., Девятов В.С. Вклад природных ресурсов в производственные функции при изменении / Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: ИГУ, 2023. – С. 233–239.
 - Тихонова А.М., Гайдукова Е.В. Вклад водных ресурсов в производственные функции при изменении климата / Гидрология и океанология-2024: сборник материалов конференции студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ 19 апреля 2024 г. – Казань:Бук, 2024. – С. 158–163.
 - Мирзоев В., Тихонова, А.М., Гайдукова, Е.В. Учет водных ресурсов в производственной функции хлопководства Узбекистана // Коллективная монография по материалам международной конференции «ИнжГидро - 2025» Института гидрологии и океанологии РГГМУ (г. Санкт-Петербург, 27 февраля 2025 г.). – Санкт-Петербург: ООО «Бук», 2025. – С. 84–88.

Дальнейшие разработки: в дальнейшем планируется расширить географию исследований и учесть различные условия формирования гидрологического режима рек при моделировании характеристик стока. Методика будет расширена для оценки рисков не только в сельском хозяйстве, но и в других водозависимых отраслях (энергетика, промышленность). Также необходимо разработать методики оценки испарения с разных видов подстилающих поверхностей, что позволит более точно учитывать климатическое воздействие.

Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников.

В первом разделе даётся краткая физико-географическая и климатическая характеристика территории исследования.

Во втором разделе проводится анализ данных глобальных климатических моделей.

В третьем разделе рассматриваются существующие методы расчёта статистических характеристик многолетнего стока.

В четвертом разделе производится оценка исходной гидрометеорологической информации.

В пятом разделе рассчитываются статистические характеристики многолетнего стока на ретроспективном материале.

В шестом разделе производится вероятностная оценка экономической эффективности расчетов статистических характеристик многолетнего стока в сельском хозяйстве.

1 Краткая физико-географическая характеристика района

1.1 Местоположение

Река Омь протекает по территории Западной Сибири и является правым притоком Иртыша. Исток реки - болота на Васюганской равнине. Река течет на запад, по Барабинской низменности. Ее устье находится в г. Омск, на 1831 километре ниже устья Иртыша. Длина реки составляет 1091 км, площадь бассейна – 52 600 км² [24].

Река Ишим протекает на территории России и Казахстана. Она является самым полноводным притоком Иртыша. Длина реки составляет 2450 км, а площадь бассейна – 177 000 км² [14].

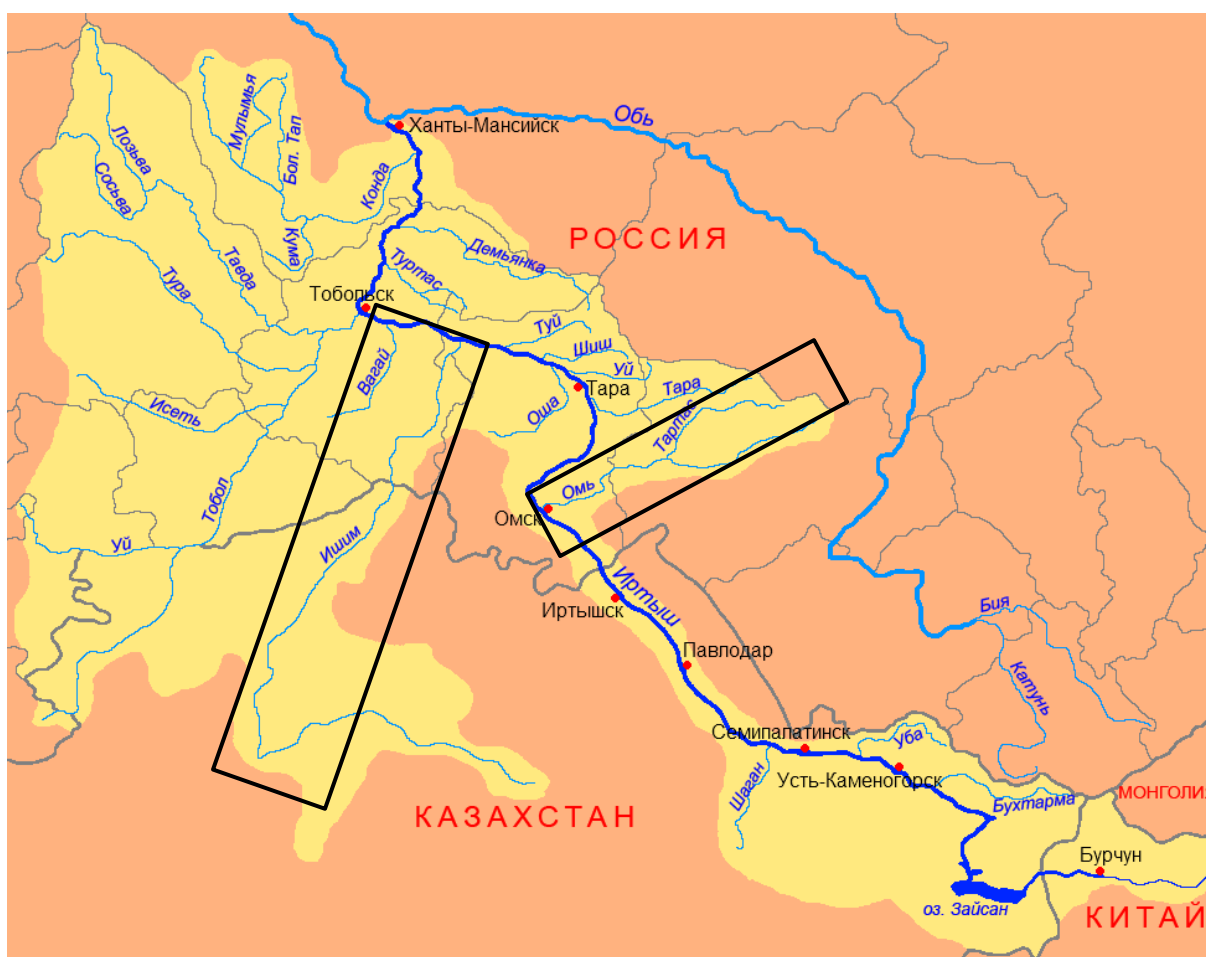


Рисунок 1.1 – Местоположение р. Ишим и р. Омь [24].

Река протекает по Западно-Сибирской равнине. Ее границами являются Уральские горы, а на востоке она граничит с Енисейским кряжем. На севере равнину омывает Карское море. Площадь Западносибирской равнины составляет около 3 млн. км², а длина достигает 2500 км с юга на север, а с запада на восток – 2000 км.

1.2 Гидрологическая изученность

На территории Западной Сибири очень хорошо развита гидрологическая сеть, реки относятся к бассейнам Оби и Иртыша. В южной части региона реки имеют замкнутый сток, их русла характеризуются мелкими уклонами и небольшими изменениями течения. На севере территории прослеживаются максимальные пики в половодье, на юге половодье - маловодное, для этой части характерна летне-осенняя межень. В зимние периоды наблюдаются заторные явления.

На равнине располагается более одного миллиона озер. Самое большое озеро Чаны. Оно является соленым и бессточным. Максимальная глубина равна 10 метрам. Большую часть всей территории занимают болота, одной из самых больших систем являются Васюганские болота. Практически вся территория занята лесами.

Все реки имеют, в основном, зависят от осадков. Оно разделяется на дождевое, снеговое, ледниковое, смешанное.

Долина реки Омь в верхней части выражена неясно, так-как склоны сливаются с равниной. В среднем и нижнем течении долина реки практически на всем ее протяжении имеет форму трапеции, местами ассиметрична. Ширина варьируется от 200 метров до 18 км. Склоны в верховьях реки пологие, с небольшим и равномерным наклоном, в нижнее течение склоны приобретают крутизну, иногда становятся обрывистыми и изрезанными балками. Пойма реки преимущественно двусторонняя, пойменные участки

развиты по берегам одинаково и имеет одинаковую ширину. В нижнем течении переходит в одностороннюю, ближе к устью правый берег становится более крутым. Местами пойма заболочена.

Русло у истока неясно выражено, с множеством небольших озерных расширений, соединенных между собой рекой, в пойме есть небольшое количество стариц. Ниже по течению река начинает меандрировать. Глубина воды составляет 0.3–4.1 м. Питание реки преимущественно снеговое.

Уровни воды в нижнем течении реки находятся в подпоре относительно Иртыша, поэтому режим реки полностью зависит от режима Иртыша. Половодье на реке начинается в апреле и заканчивается в начале июня. Из-за подпора вода часто достигает опасных отметок. При этом максимальные скорости течения наблюдаются на спаде половодья, а не на пике, что характерно для подпорных участков рек. У Оми довольно сильные колебания стока. скорости течения летом изменяются от 0.10 до 1.2 м/с. зимой скорости течения могут падать до 0.01 м/с.

В бассейне реки ярко выраженная летне-осенняя межень, которая длится около 70 дней. Иногда случаются дождевые паводки, из-за обильных осадков, но это достаточно редкое явление. Чаще всего обильные осадки наблюдаются на спаде половодья. Также на реке присутствует зимняя межень, она довольно продолжительна и устойчива (в среднем 150 дней).

Ледовые явления начинаются наблюдаться в среднем в третьей декаде октября, в конце месяца начинается становление ледостава. В некоторые зимы река не замерзает, либо замерзает частично. В конце марта наблюдается самая большая толщина льда. Весенний ледоход начинается в начале апреля и длится недолго. На Оми нет ярко выраженного ледохода и заторных явлений. В районе подпора ледохода не бывает, лед быстро стаивает. В начале половодья по реке проходит Иртышский лед. Полностью очищается ото льда река во второй половине апреля.

Вода в реке достаточно мутная, мутность в среднем составляет 79 г/м³. На это указывает большое содержание взвешенных наносов, из-за медленного

течения реки и сложенных глинистыми и песчаными породами берегов, склонных к размыву.

Зимой река переходит на подземное питание, из-за этого увеличивается минерализация воды, она может варьироваться от 1000-15000 мг/л. Жесткость также увеличивается в период зимней межени, и вода становится очень жесткой.

В Омь впадает более десятка рек: р. Тарбуга, р.Ачаирка, р.Еланка, р.Тарка, р.Даниловка, р.Тартас, р.Кама, р.Кулас. р.Ича, р.Узакла, р.Казык, р.Кондусла, р.Угурманка, р.Рябковка. р.Мусиха. р.Амгут. р.Убинка. р.Ича, р.Сенча. р.Ляча [24].

Самые крупные притоки: р. Ича, р.Кама, р. Тартас.

Река Ича берет начало в болотной системе Убинского района на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Впадает в р. Омь в 993 км от устья реки. Длина реки - 257 км, а площадь водосбора составляет 3570 км².

Река Кама - правый приток Оми. Она протекает на северо-западе Новосибирской области. Берет начало в болотах Барабинской низменности. Протяженность реки составляет 22 км. Площадь бассейна – примерно 2680 км². Свое начало река берет у озера Пичурла в Венгеровском районе. Впадает в Омь на 529 км ниже ее устья.

Длина реки Тартас – 566 км. Она расположена на Западно-Сибирской равнине. Площадь водосбора 16200 км². Исток реки расположен у Васюганских болот. В гидрографическую сеть реки выходят Калгач, Темряк, Урез и Изес. Русло сильно изрезано меандрами, при относительно слабо выраженной долины. У реки смешанный тип питания, с преобладанием снегового. Амплитуда годовых колебаний стока составляет 3.5-4.5 метра, скорость течения реки очень низкая, а среднегодовой расход составляет 22 м³/с.

В последние годы Омь и её притоки осушаются, вероятно это связано с сокращением водосбора из Васюганских болот.

В бассейне реки Омь активно развиваются эрозионные процессы, уклоны рек способствуют плоскостной эрозии. В районе преобладают черноземы, которые являются легко размывными. Из-за континентального климата процессы разрушения сильно ускоряются. Самой главной причиной эрозии является развитое сельскохозяйственное освоение региона. Плохие системы орошения способствуют активному размыву почв. Самые распространенные типы эрозии: плоскостная, линейная и береговая.

Река Ишим берет начало в горной местности, в окрестностях Нияз. В верховьях река имеет режим схожий с горными реками. На территории Казахстана Ишим имеет узкую извилистую долину. При выходе на Западно-Сибирскую равнину долина расширяется и приобретает широкую пойму с большим количеством заболоченных стариц. На территории России Ишим является судоходным, навигация начинается в мае, заканчивается в октябре.

Питание реки преимущественно снеговое. На режим Ишима значительное влияние оказывают болота. Одной из особенностей режима реки является многолетнее колебание стока. В маловодные годы сток может уменьшаться в 7-10 раз по сравнению с среднемноголетним. Средний расход воды на гидрологическом посту расположенном составляет 83,1 м³/с, наибольший – 712 м³/с. Максимальный расход воды реки Ишим в верхнем течении – 1080–1100 м³/с, Среднегодовой расход воды – 1,11 м³/с.

Так-как река Ишим пересекает несколько природных зон, на ее участках наблюдается различный гидрологический режим и колебания стока. На Ишиме ярко выраженное весеннее половодье, которое начинается в начале-середине апреля. Объем стока за половодье составляет примерно 60-80% от среднегодового объема воды. Для реки характера ярко выраженная летне-осенняя межень, которая начинается в июле-августе и длится несколько месяцев. В зимние месяцы река переходит на подземное питание, однако имеет преимущественно талон питание (90%).

Ледовые явления начинаются в октябре-ноябре. К середине ноября река уже полностью покрыта льдом. Вскрытие льда начинается в апреле-мае.

Основные притоки Ишима: Колутон, Жабай, Акканбурлык, Большая Тава, Карасуль, Ир.

Карасуль – река, протекающая в Тюменской области России, левый приток реки Ишим. Длина реки составляет 128 км, площадь бассейна – 2660 км². Исток находится в болотах. В Карасуль впадает четыре реки: Камышка, Лекан, Черемшанка, Таловка. Максимальные объемы стока приходятся на половодье. Минимальные месячные расходы речного стока наблюдаются в межень, преимущественно в сентябре-октябре.

Ир – несудоходная река, протекающая в северо-восточной части Тюменской области и в северо-западной части Омской области (верхнее течение). Длина реки составляет 86 км, а площадь водосбора 1020 км².

Большая Тава – река в Омской области России, правый приток Ишима. Исток находится у слияния рек Дурницы и Скакунки. Река впадает в р. Ишим в 37 км от его устья. В реку впадают р. Малая Тава и р. Тевриз. Длина Большой Тавы – 193 км, площадь водосбора – 2600 км². Глубина может достигать 2 м [14].

1.3 Рельеф, геологическое строение

Южная часть Западно-Сибирской равнины сильно изменена, на нее оказывает большое влияние антропогенный фактор. На ее территории добывают нефть и газ, их разработка приводит к разрушению пород, слагающих равнину.

Западно-Сибирская равнина расположена на территории палеозойской Западно-Сибирской плиты, которая представляет собой крупную молодую тектоническую структуру. В основании плиты лежит депрессия, представленная разновозрастными геологическими комплексами: байкальской, каледонской, герцинским. Максимальная глубина залегания

фундамента составляет 13 км в северных районах, в южную сторону она уменьшается до 3 км в зоне Среднеобской антиклизы.

Осадочный чехол состоит из мезозойских и кайнозойских отложений морского типа, эта вызвано неоднократными трансгрессиями.

Во времена плейстоцена территория подвергалась гляциальным воздействиям, после чего остались следы демянского, самаровского, тазовского, зырянского и сартанского оледенений. Они располагались в районе Полярного Урала и плато Путорана. Из-за уклона равнины в северную сторону, талая вода текла в этом направлении и на краях плато образовались предледниковые водоемы.

В основании чехла лежит комплекс терригенных континентальных триасово-нижнеюрских отложений, заполняющих тафрогены. Отложения которых содержат платобазальты. По всей площади равнины находят болотные отложения – маломощные юрские глины баженовской свиты, меловые морские пески, глины и опоки. В некоторых частях развит четвертично ледниковый покров. Озерные отложения на южной части платформы имеют в своем составе соду и залежи торфа. На территории Западно-Сибирской платформы также расположена большая артезианская область [4].

Западно-Сибирская равнина – низменность с перепадом высот и повышениями по краям. Нынешний рельеф равнины сформирован под влиянием экзогенных процессов. Равнина имеет общий уклон в северном направлении. Вся северная часть имеет небольшую высоту, менее 100 метров. По краям есть поднятия – Северо-Сосьвинская, Верхнетазовская, Нижнеенисейская возвышенности, Приобское плато, Ишимская и Кулундинская равнины. В средней части равнины ярко выражена полоса Сибирских Увалов.

Для долин рек на рассматриваемой территории характерна боковая эрозия, из-за того, что у них чаще всего выработанные продольные профили. Молодые реки часто меандрируют их долины террасированные. На участках с

излучинами увеличивается шанс бокового размыва. Размыву также способствует строение почв, в верхней части геологического разреза присутствует палеоген, неоген, четвертичных песчано-глинистых отложений. Поймы и террасы, сложенные песками, супесями и суглинками, которые отлично размываются. Берега крупных рек чаще всего состоят из глин, поэтому медленно размываются. Глины относятся к более древним палеоген-неоген-нижнечетвертичными породами.

На территории Западной Сибири активно развиты экзогенные геологические процессы. Они вызывают эрозионные процессы, разрушающие берега. Особенно распространены выветривание, оползни, суффозия, оврагообразование, которые активизируют размывную деятельность [4].

1.4 Почвы

На распределение почв влияют климатические условия. На территории равнины почвы идут с севера на юг, следующим образом: тундрово-глеевые, дерново-подзолистые, черноземы, каштановые.

Самые распространенные почвы – полугидроморфные. Они характерны для заболоченных зон. На юге территории уже встречаются солонцы и солоды.

Подзолистые типы почв являются кислыми, влияние на которые оказывает хвойные растения. Под внешним слоем почвы находится подзольный слой почвы.

Дерново-подзолистые почвы имеют достаточно плодородный верхний слой почвы. Этот тип характерен для зон смешанных лесов. На такие почвы оказывает влияние травянистые растения, которые дают возможность развиваться микроорганизмам внутри почвы.

Основным фактором, влияющим на развитие болотно-подзолистых почв, является слабое дренирование, поэтому они распространены в болотистых районах. Обычно он формируется в таежных районах.

Дерновые почвы образуются на территориях с травянистыми растениями в степях, где нет деревьев и практически отсутствуют кустарники.

Мерзлотно-таежные. Формируются под влиянием северного климата на равнинах и в горной местности, для них характерна большая глубина промерзания.

Черноземы - самые плодородные почвы, распространены в зонах равнин со смешанными лесами.

1.5 Климатическая характеристика

Климат в рассматриваемом районе резко-континентальный с резкими перепадами температура воздуха в течение года. Лето короткое, но достаточно жаркое, зима длинная с очень низкими температурами.

Зимой среднемесячные температуры изменяются от -8 до -25 °С. Редко зимой наблюдаются оттепели.

В весенние месяцы наблюдается резкое повышение температуры, уже к середине марта столбики термометров достигают $+15$ С.

Среднемесячные температуры летом колеблются от $+15$ до $+25$ °С. Осадки выпадают в небольшом количестве, только в июле бывают периоды с затяжными дождями.

Из-за геологического строения района температура имеет большое пространственное распределение. Среднегодовая температура в районах Урала составляет $+ 5$ °С. Летом васюганские болота снижают температуру воздуха на всей Западно-Сибирской равнине. Но все равно из-за редкой сменяемости циклонов территория получает большое количество тепла и небольшое количество осадков. Западный перенос, как и на Русской равнине, сохраняется, но влияние Атлантики здесь заметно ослаблено. Так-как территория равнинная, на ней возникает глубокий меридиональный воздухообмен. Зимой климат формируется под влиянием Сибирского

антициклона, это приводит к пониженному давлению над северной частью равнины. Ветровой перенос направлен в южную сторону. В холодный период выпадают 40-60% от среднегодового количества осадков. Снежный покров устанавливается в среднем в начале ноября и лежит около 6 месяцев. Его высота может достигать 60 см в лесной зоне, 40 см в тундре. В летний период давление на Западно-Сибирской платформе снижается к юго-востоку. При этом усиливается роль западного переноса. На теплые месяцы приходится 30-20% осадков, особенно их много в июле-августе. В среднем выпадает 350 мм жидких осадков в год. Регион относится к зонам с недостаточным увлажнением, на юге коэффициент увлажнения меньше 1.

1.6 Растительность

Зональность природных зон на равнине ярко выражена. Зоны меняются с севера на юг: тундра, лесотундра, леса (лесо-болота), лесостепь, степь. Тундра тянется с побережья Карского моря до Полярного круга, ее протяженность составляет 500 км. Зима длится с октября до середины мая, средняя температура воздуха составляет -20 °С. Снежный покров лежит около 9 месяцев. Лето продолжается около одного месяца. Средняя температура +5 °С. Осадков за год выпадает 350 мм. Лесотундра занимает относительно небольшую часть - 400 км, расширяясь от Урала к Енисею. Климат субарктический и более континентальный, чем в тундре. Зима здесь более суровая, но и лето более жаркое. Тайга занимает большую часть площади Западно-Сибирской равнины. Климат в районе умеренный континентальный. Средняя температура зимой изменяется от -18 °С до -28 °С. Летом температура составляет +14 °С. Лесостепь составляет неширокую полосу от Урала до Салаирского кряжа. Климат в районе умеренно-континентальный, с холодной зимой без осадков и теплым сухим летом. Средняя температура составляет -17 °С, а летом +18 °С. Степная зона расположена на юге Западной Сибири, здесь

много озер, климат более континентальный (мало осадков, холодные зимы). Средняя температура зимой составляет -17°C , а летом $+20^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков 350–400 мм, причем большая часть осадков выпадает летом.

Из-за большого распространения болот, на территории Западно-Сибирской равнины множество еловых лесов, с пихтовыми, сосновыми деревьями. В лесотундре распространены лиственные растения. В смешанных лесах большую часть занимают березы. Более 4 % территории занимают пойменные и болотные растения. Травы, которые легко переносят затопления.

1.7 Хозяйственная деятельность

Основные отрасли экономики Западной Сибири:

- Добыча полезных ископаемых. В районе находится множество крупных центров добычи нефти и газа.
- Перерабатывающие предприятия. В районе много промышленности, которая перерабатывает местное сырье, есть химические и нефтехимические предприятия.
- Металлургический комплекс: на территории Западной-Сибири производят 20% черных металлов России. Также производят цветные металлы и алюминий.
- Гидроэнергетика – на территории Западной Сибири функционирует только одна ГЭС на Оби - Новосибирская. Установленная электрическая мощность ГЭС – 490 МВт.
- Сельское хозяйство - основной производственный комплекс региона. Аграрный комплекс Западной Сибири специализируется на возведении зерновых культур, самыми распространенными среди которых являются яровые. Площадь пахотных земель составляет 37 % от общей

площади земли. Западная Сибирь является лидером по выращиванию яровой пшеницы в стране.

– В районе находится 20% пахотных угодий страны, тут господствуют оптимальные для выращивания почвы, при должном увлажнении которых будет высокий урожай [11].

В регионе активно развивается аграрная промышленность, особенно растениеводство. Площадь полей увеличивается с каждым годом в несколько раз.

Характерные черты сельского хозяйства Западной Сибири:

– Природные условия. На территории региона умеренно-континентальный климат с теплым летним сезоном, способствующий росту однолетних кормовых культур. На юге региона расположены степные и лесостепные зоны, которые идеально подходят для посевных полей. Почвы региона преимущественно черноземные и серо-лесные, являются одними из самых плодородных.

– Основные растительные культуры: яровая пшеница, рожь, лен, рапс.

– Большинство сельскохозяйственных предприятий экспортируют урожай в различные страны и выходят на мировой рынок.

– Сейчас множество сельскохозяйственных компаний сталкиваются с уменьшением урожайности из-за засух и нехватки воды для орошения культур [29].

2 Глобальные климатических моделей МГЭИК

2.1 Описание глобальных климатических моделей МГЭИК

В последнее время встал острый вопрос в изучение вопросов, связанных с глобальными климатическими изменениями. Ученые из различных стран пытаются определить причины, которыми они могут быть вызваны и оценить степень влияния на атмосферу и океан.

МГЭИК – межправительственная группа экспертов по изменению климата. Модели, разработанные этой группой, представляют собой сложные вычислительные системы, агрегирующие знания о взаимодействии системы атмосфера–океан. Ученые собрали все последние наработки в области различных дисциплин для создания ключевых инструментов в понимании причин и последствий климатических изменений [20].

Модели позволяют максимально подробно и точно учесть все основные метеорологические процессы: и общую циркуляцию атмосферы, учитывая взаимодействия в атмосфере солнечного и инфракрасного излучения, а также изменение облачности, расчет процессов происходящих на поверхности суши, например накопление и таяние снега, теплопроводность и влагопроводность почвы, насыщенность атмосферы водяным паром, учитывая парциальное давление, формирование речного стока, общую циркуляцию океана.

Существует несколько типов моделей:

А) Модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА): модели, которые рассматривают взаимодействие компонентов атмосферы, океана, суши, криосферы. Они решают фундаментальные уравнения, описывающие, движение жидкости, теплопередачу от океана атмосфере и наоборот, радиационный баланс, круговорот воды и другие процессы. Именно эти модели используются для долгосрочных прогнозов.

- Б) Региональные климатические модели (РКМ): эти модели имеют более высокое пространственное разрешение, чем глобальные климатические модели. Они разработаны для конкретных территорий, учитывая их региональные особенности атмосферы и других компонентов. Для этих моделей задаются конкретные граничные условия, позволяющие спрогнозировать климатические изменения для региона.
- В) Модели Земной системы (МЗС): расширяют модели общей циркуляции, включая дополнительные компоненты, такие как динамика экосистем, углеродный цикл и биогеохимические процессы в океане. Это одни из самых сложных моделей, позволяющие учесть все факторы, влияющие на работу климатических систем.
- Г) Модели с упрощенной сложностью: Эти модели, такие как *Energy Balance Models* или *Earth System Models of Intermediate Complexity*, Практические не учитывают физические процессы, используются для математического моделирования основных климатических механизмов и анализа ансамблей сценариев.

Климатические модели основаны на численных методах решениях системы дифференциальных уравнений, которые описывают основные физические процессы. Уравнение Навье-Стокса описывает движение жидкости (в системе атмосфера - океана), уравнение энергии рассчитывает перенос тепла, уравнение сохранения массы, уравнения радиационного переноса, уравнения состояния, связывающие термодинамические свойства веществ (температуру, давление, плотность). Вышеперечисленные уравнения решаются численными методами, такими как:

- Конечные разности: используются для аппроксимации производных конечными разностями для численного решения дифференциальных уравнений, этот способ чаще всего применяется для учета граничных условий, при решении региональных задач.
- Конечные элементы: позволяют разбить область на конкретные элементы и решить задачу для каждого.

– Спектральные методы: представляет систему в виде разложенного базисного спектра.

Для решения более локальных задач, модели необходимо параметризовать, то есть решить задачу аппроксимации на основе эмпирических и теоретических отношений. Например, учет формирования облаков, осадков и конвекции.

Для валидации климатических моделей необходимо сравнить прогнозные данные с историческими. Климатически модели являются инерционными и оцениваются по их возможности воспроизводить наблюдаемые климатические изменения в прошлом. Результаты различных моделей сравниваются между собой для оценки неопределенности и выявления консенсусных прогнозов, которые показывают приближенные значения.

Климатические модели используются для прогнозирования глобальных климатических изменений на основе различных сценариев будущих выбросов парниковых газов и других факторов, влияющих на атмосферу. (например, изменение промышленной политики).

В работе были рассмотрены сценарии из группы *SSP (Shared Socioeconomic Pathways)* – это сценарии изменения климата, которые моделируют глобальные социально-экономические изменения до 2100 года. В группу входят различные сценарии: *SSP1-2.6* – наиболее умеренный, подразумевает быстрое принятие мер, резко ограничивающих, а затем и почти полностью прекращающих антропогенное воздействие. *SSP5-8.5* – самый жесткий, подразумевает наиболее быстрые изменения климата из-за увеличения антропогенной эмиссии. *SSP3-2.7* и *SPP2-4.5* – средние пути, учитывающие небольшие региональные конфликты и незначительное увеличение промышленных выбросов.

В каждый путь входят различные ансамблевые модели, поэтому получается несколько десятков вариаций. Они учитывают разную степень реакции океана и атмосферы на различные вариации антропогенного

радиационного воздействия. В название каждого сценария входит указание на степень антропогенного радиационного воздействия, например в сценарии *SSP 3.27* радиационное воздействие составляет 3.27 Вт/м². От его степени зависит распределение CO₂ в климатических системах. Содержание антропогенных эмиссий CO₂ примерно поровну распределяется между океаном и атмосферой, в будущем ситуация может измениться. Моделирование, как раз позволяет оценить степень изменения данного распределения.

Существуют сотни различных видов моделей, которые позволяют учесть различные факторы, влияющие на климатические процессы.

Названия климатических моделей в рамках шестого доклада проекта МГЭИК сформировано согласно разработанной системе обозначений, позволяющей однозначно идентифицировать учтенные компоненты. Система обозначений состоит из нескольких элементов. В название модели содержится указание на разработчика (например, *MPI* – Институт метеорологии Макса Планка), тип модели (например, *ESM* – модель, включающая биогеохимические циклы), версию модели, разрешение, указание на смоделированную переменную (например, *pr* – осадки), указание на группу сценариев (*SSP*). Также в кодировке содержится указание на временной период, на который произведено моделирование (*historical* – исторические симуляции). В некоторых моделях рассматриваются дополнительные параметры, например *abrupt-4xCO2*.

Модели входят в различные ансамбли, у каждого из которых есть определенный идентификатор [15].

- а) *rN* – индекс реализации (указывает на версию калибровки модели)
- б) *iN* – индекс инициализации (указание на начальные условия)
- в) *pN* – версия параметризации
- г) *fN* – индекс воздействий (указание на тип внешних факторов)

Для работы с данными *CMIP6* необходимо учитывать все составляющие кодировки названия модели, так как каждая часть несет важную информацию о ее характеристиках, для получения необходимых данных.

Одной из самых распространенных баз данных, хранящих результаты моделирования *CMIP*, в том числе данные шестого оценочного доклада МГЭИК, является *Earth System Grid Federation (ESGF)*.

ESGF – система, объединяющая реализации различных сценарных ансамблей, позволяющая фильтровать данные по различным составляющим (временные интервалы, граничные и начальные условия, количество запусков модели, прогнозируемые параметры). Данные хранятся в формате *NetCDF* с метаданными *CF-Conventions*.

В метаданных содержится полная информация о характеристиках модели и ее идентификационных параметрах. Вся информация единообразна и стандартизирована в соответствии с конвенциями *CF* (климат и прогноз) и включает физические величины, единицы измерения, методы обработки, данные о временном периоде и сценарии.

Один из основных пунктов метаданных, это пространственно-временная спецификация. Она дает информацию о разрешении модели, размерность ее географической сетки, системе координат, начальных и граничных моментов. Также метаданные включают технические детали: формат хранения, степень сжатия и историю обработки файлов, разрешение модели.

Данные на платформе *ESGF* хранятся в формате *NetCDF (Network Common Data Form)*, который является стандартом для хранения многомерных геоинформационных данных, включая переменные, которые присутствуют в климатических сценариях. Этот формат представляет собой само документируемый бинарный формат, разработанный для хранения и обмена многомерными пространственными данными (климатические модели, спутниковые наблюдения и результаты численных экспериментов. Формат основан на иерархической структуре, включающей переменные (многомерные

массивы данных), геоданные (оси координат, например, время, широта, долгота) и атрибуты (метаданные).

ESGF имеет распределённую архитектуру узлов данных (включая *LLNL* –главный координационный узел *ESGF* для моделей *CMIP6*), поддержку протоколов *OPeNDAP* и интегрируется с программными инструментами (*Python*). В базе данных есть доступ к историческим данным моделям, прогнозным данным, с разной степенью проверкой, а также к сырым данным.

Данные, полученные в результате моделирования, хранятся в формате *NetCDF*, совместимым с многими специализированными открытыми библиотеками (*CDO*, *xarray*, *NCL*). Это позволяет проводить многомерный анализ климатических данных.

Для обработки *NetCDF*-файлов существует множество инструментов, включая библиотеки для языков программирования в *Python*. В нем библиотека *xarray* предоставляет возможности для работы, позволяя раскрывать данные в виде многомерных массивов с поддержкой загрузки больших пакетных данных.

Перед работой необходимо тщательно изучить все существующие сценарии и ансамбли и грамотно подобрать необходимые для исследований модели. Для оценки репрезентативности, используемых моделей, необходимо провести ретроспективный анализ. Также нужна верификация модельных данных, путем сравнения с историческими. Для каждой модели, есть исторические реализации.

Несмотря на детальную разработку, сейчас модели сталкиваются с большим количеством неопределенностей и ограничений, которые влияют на точность прогнозов. Многие климатические модели основываются на математическом анализе и не учитывают физику процесса. Некоторые модели неверно учитывают начальные и граничные условия. Начальные условия обозначаются температурой океана, концентрацией парниковых газов, данными о состоянии ледового покрова. Многие физические процессы невозможно описать с помощью глобальных

климатических моделей, так-как они настроены на слишком крупные масштабы и не улавливают мелкомасштабные волнения. Поэтому ученым приходится упрощать расчеты и параметризацию, что вносит большую погрешность в расчеты.

Еще одной проблемой, которую пока не смогли окончательно решить является учет обратных связей. Не все процессы оказывают однозначное влияние на атмосферу и океан. К примеру, увеличение облачности может привести к усвоению парникового эффекта, но с другой стороны облака отражают солнечное излучение. Поэтому этот вопрос требует более тщательного изучения. Нужно также помнить, что даже современные суперкомпьютеры неспособны обеспечить необходимое разрешение для математических моделей, из-за этого приходится пренебрегать точностью в пользу производительности.

Для того чтобы избавиться от вышеперечисленных ошибок, используют ансамблевое моделирование, запускают несколько вариаций одной модели, задавая различные начальные и граничные условия. Данный метод позволяет выявить наиболее вероятные тенденции и расширить диапазон моделирования. Ансамбли показывают довольно большие различия, даже в температуре воздуха колебания могут достигать пару градусов, что критично для региональных прогнозов.

Большинство моделей рассматривает только антропогенное воздействие, но самом деле климат также зависит от естественных изменений. Вулканическая активность охлаждает атмосферу из-за выбросов аэрозолей. Изменение солнечной активности, также может происходить без человеческого вмешательства. Не стоит пренебрегать также воздействием океанических колебаний, таких как Эль-Ниньо и Североатлантическое. Естественные факторы сложно предсказать на несколько десятилетий вперед, поэтому ученые часто пренебрегают ими.

Ансамбли продолжают совершенствоваться. В будущем планируется:

а) Увеличение разрешения – переход к моделям с разрешением в несколько километров для более точного прогнозирования региональных изменений.

б) Использование машинного обучения для ускорения расчетов и правильного учета начальных и граничных моментов.

в) Учет социально-экономической динамики – развитие моделей, связывающих климатические изменения с демографией, экономикой и политическими решениями.

г) Учет естественных изменений – более тщательное изучение влияния процессов и учет обратных связей.

В любом случае, климатические модели являются ключевым инструментом для оценки будущего взаимодействия в системе атмосфера–океан. Сейчас нельзя однозначно сказать. Какой из сценариев будет наиболее вероятным, поэтому необходимо рассматривать влияние всех путей развития.

2.2 Анализ глобальных климатических моделей МГЭИК

Перед окончательным выпуском модели подвергаются тщательному анализу. Комплексная процедура верификации включает в себя несколько этапов.

– Ретроспективный анализ

Модели тестируют на способность моделировать ретроспективные климатические условия. Для этого задаются граничные условия, описывающие состояние атмосферы и океана в прошлом. Далее сравниваются модельные параметры с ручными данными наблюдения и палеоклиматическими. Количественная оценка производится с помощью: коэффициента детерминации (R^2), нормализованной среднеквадратичной ошибки, индекс согласия по Уилмоту [20].

– Сравнительный анализ моделей (CMIP-протокол)

В рамках проекта *CMIP6* осуществляется ансамблевый анализ. Внутри каждой группы моделей оценивается разброс, выявляется систематическое смещение с помощью анализа главных компонент, кластерного анализа, расчет конвергенции.

- Оценка физической составляющей

В этом методе проверяются физические компоненты модели. Оценивается баланс между входящей и уходящей радиации, сохранение энергии. Анализ чувствительности к изменению климатических параметров. Верификация параметров.

- Оценка экспертов

Существует несколько процедур, на которых формируется экспертная оценка: *MIP*-проекты, *IPCC WGI* — экспертный анализ ансамблей моделей, открытая публикация ансамбля в *ESGF*-архивах для дальнейшей проверки [20].

Все модели проходят многоуровневую проверку, сочетающую в себе различные методы, которые учитывают в том числе и физические процессы, влияющие на климатические процессы. Именно такой подход гарантирует надежность прогнозных значений.

2.3 Анализ ретроспективных данных глобальных климатических моделей

Не все ансамблевые реализации показывают адекватные результаты, хотя и проходят первичные проверки по протоколу *CMIP6*. Нужно понимать, что не все модели способны смоделировать процессы для конкретной территории. Разные научные группы разрабатывают свои версии ансамблей, которые лучше работают в различных регионах. Региональных моделей небольшое количество, поэтому перед тем, как использовать данные глобальных климатических моделей, необходимо провести их анализ. Ошибки

в моделях могут привести к некорректным расчётам в дальнейших исследованиях. Для отбора более надежных моделей был произведен анализ ретроспективных данных.

Модели должны адекватно описывать исторические данные, если они с этим не справляются, то их необходимо отбраковать.

В работе был произведен расчет среднеквадратичной ошибки для каждой ансамблевой модели (2.1).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{n}} \quad (2.1)$$

где σ – среднеквадратичная ошибка;

n – количество лет;

y_t – модельное значение за год t ;

$\hat{y}_t$ – фактическое значение за год t .

Это функция потерь, которая используется в статистике для оценки эффективности. Она рассчитывает среднее квадратическое отклонение между фактическими и модельными значениями.

Для оценки разброса по рассчитанным среднеквадратическим ошибкам были построены графики распределения (Рисунки 2.1–2.2).

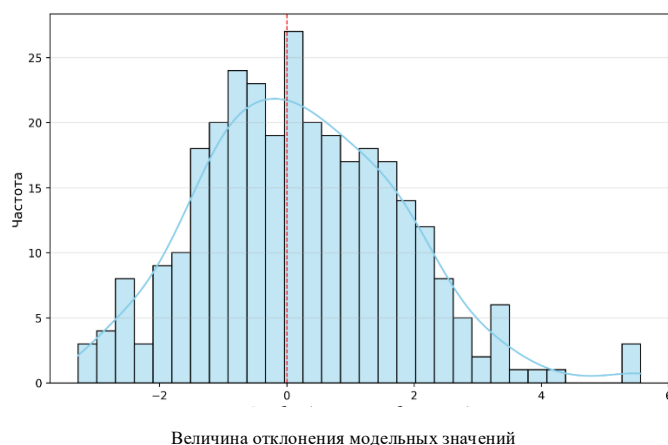


Рисунок 2.1 – Распределение ошибок моделей (для температуры воздуха)

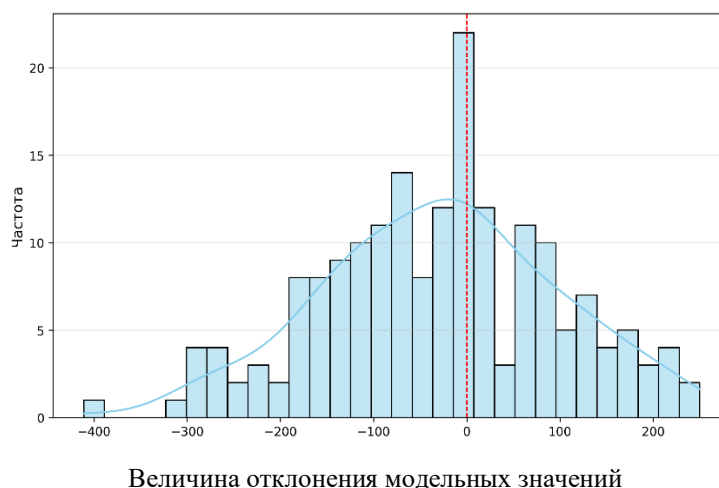


Рисунок 2.2 – Распределение ошибок моделей (для осадков)

На основе полученных графиков, можно сделать следующие выводы:

- А) Ошибки расположены около 0, что говорит об отсутствии систематических ошибок в целом;
- Б) У графика моделей температуры воздуха тяжелый хвост уходит вправо;
- В) Большая часть модельных значений температур воздуха отклонилась от фактических ошибок на 0,3 градуса, что не является критичной ошибкой;
- Г) График осадков имеет симметричное распределение, ошибки составляют меньше 100 мм;
- Д) Большинство моделей показывают удовлетворительные результаты;
- Е) Некоторые группы моделей сильно занижают или завышают значения, поэтому они не могут использоваться в дальнейшем исследовании.

После анализа были отбракованы модели с большими среднеквадратичными ошибками и построены совмещенные графики фактических и модельных (средних для всех моделей) значений (Рисунки 2.3

–2.4). Можно сделать вывод, что модели улавливают общий тренд, но плохо описывают экстремальные значения.

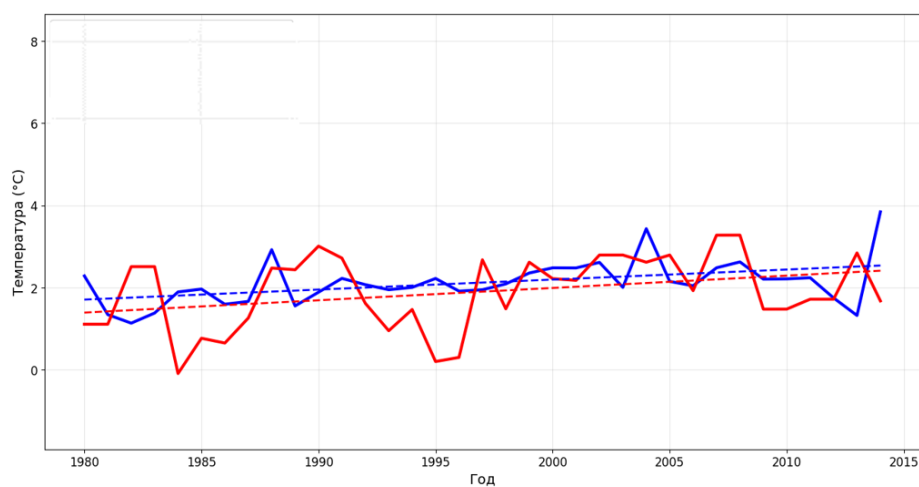


Рисунок 2.3 – Совмещенный график модельных и фактических значений приземной температуры воздуха

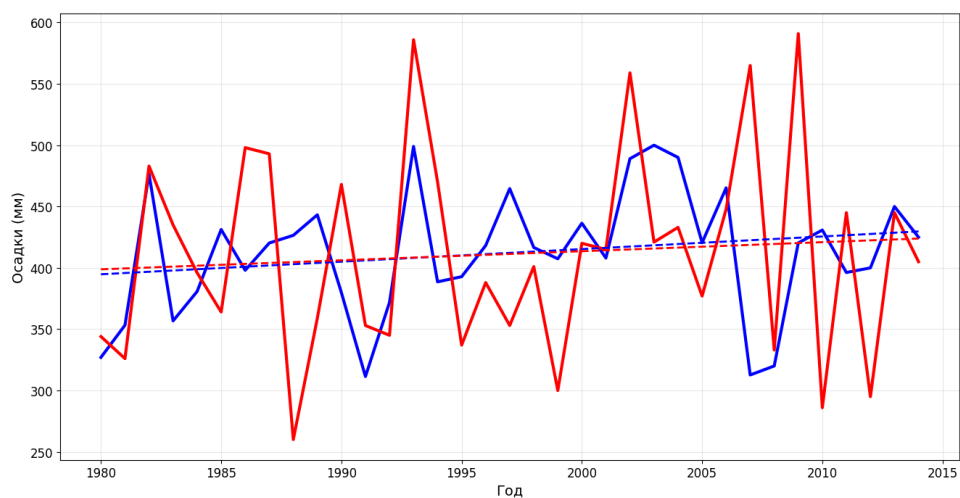


Рисунок 2.4 – Совмещенный график модельных и фактических значений осадков

2.4 Обработка климатических данных с использованием языка программирования *Python*

Для обработки архивных файлов, полученных с платформы, мы воспользовались методами программной распаковки с использованием языка *Python* (Приложение А). Библиотека, которого, содержит специализированные методы для обработки файлов *NetCDF*. Процесс распаковки файла подразумевает постепенную обработку метаданных, пространственно-временной информации и переменных из архива.

После успешной распаковки данных необходимо их обработать и вывести из «сырого» вида. Инструменты *xarray* и *netCDF4*, необходимы для работы с многомерными климатическими данными, они обеспечивают распаковку, обработку и визуализацию данных.

В ходе работы была написана программа для распаковки архивов данных *NetCDF* с модельными реализациями осадков и приземной температуры воздуха. Программа позволяет загружать файлы в формате *.nc*, содержащие результаты климатического моделирования. На первом этапе программа определяет необходимую переменную для обработки. В программе есть два модуля, первый обрабатывает файлы с переменной *tas* (температура воздуха), второй с переменной *pr* (осадки). Это необходимо для оптимизации обработки и дает возможность загружать пакет данных.

После успешного идентифицирования переменной, происходит извлечение значений и атрибутов модели, включая единицы измерения. Чаще всего в моделях используются стандартные единицы измерения – для температуры – °K, осадков – кг м²/с.

Для того чтобы получить значения для конкретной точки на сетке координат, в программу вложена функция интерполяции методом по ближайшему соседу. Выбирается значение ближайшего известного пункта данных без учёта значений окружающих точек. Этот метод позволяет работать с регулярными сетками, которые используются в глобальных климатических

моделях. После ввода пользователем необходимых координат. Программа автоматически определит входят ли они в координатную сетку модели. После интерполяции, данные автоматически переводятся в °С для переменной *tas*, в мм/год для осадков.

Для наглядного представления о пространственном изменении переменных (приземной температуры воздуха и осадков) были построены карты с изолиниями. Также с помощью метода ближайшего соседа создается сетка растровых данных из разрозненных точек данных. По набору пространственно-временных данных строится карта с использованием цветовой шкалы.

Изолинии строятся с помощью функций из библиотеки *Python*. Выбор частоты нанесения происходит автоматически и зависит от масштаба карты, величины и характера колебаний числовых значений показателя.

Программа также позволяет провести осреднение значений для одного года, который присутствует в пространственно-временных данных модели. Результат выводится в виде текстового файла и карты с изолиниями.

На Рисунках представлены карты, полученные после обработки данных по двум одинаковым моделям из противоположных сценариев *ssp5.85* и *ssp1.26*. Красной точкой отмечена метеостанция, расположенная в городе Омск.

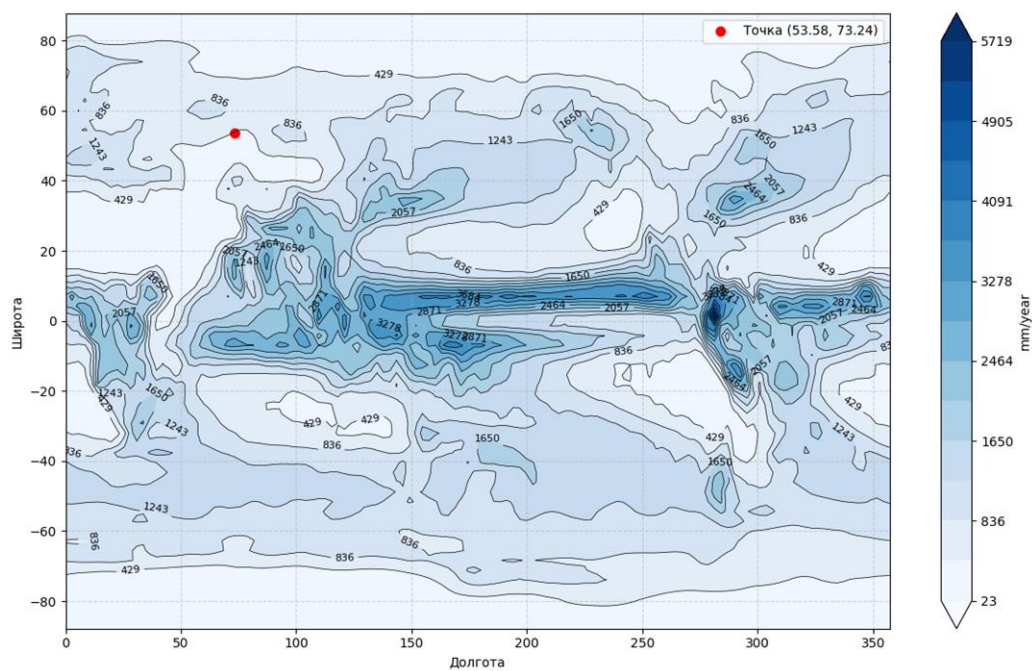


Рисунок 2.5 – Карта осадков на 2050 год (модель *MP1-ESM1-2LR_ssp126_r1i1p1f1*)

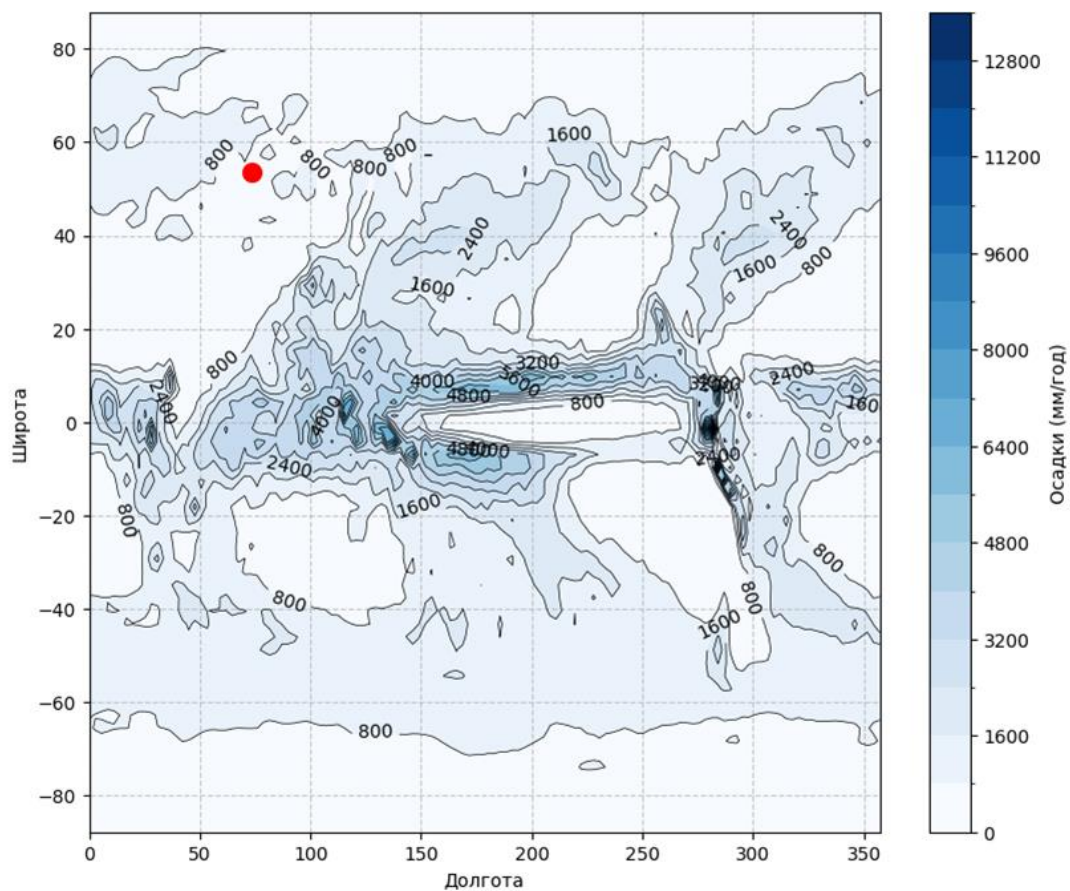


Рисунок 2.6 – Карта осадков на 2050 год (модель *CanESM5_ssp126_r1i1p1f1*)

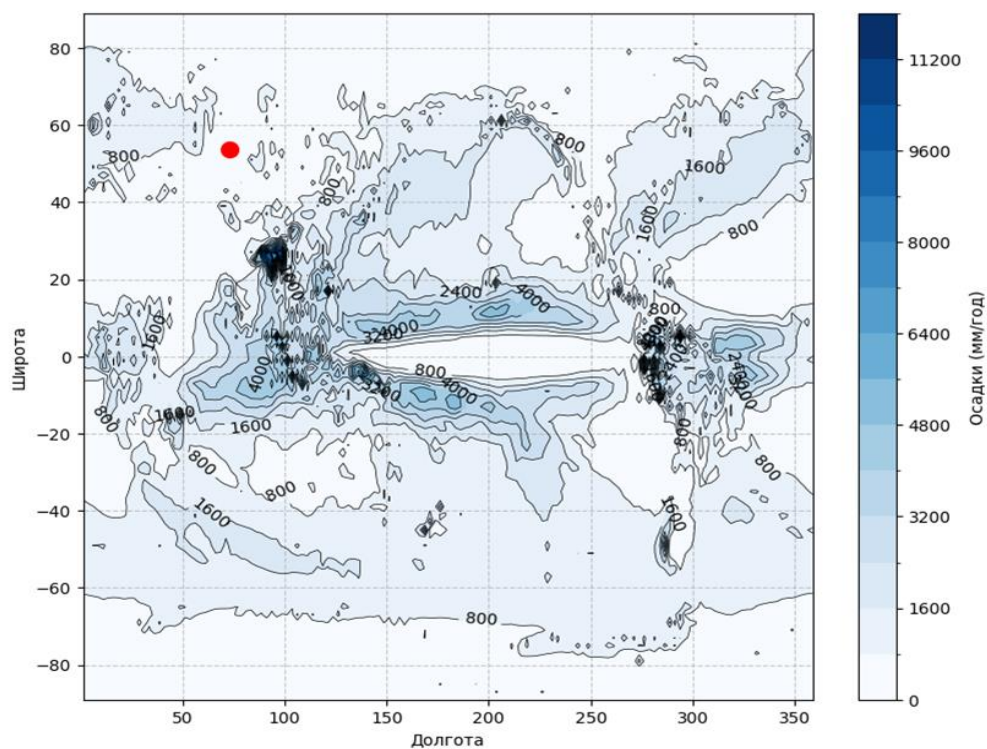


Рисунок 2.7 – Карта осадков на 2050 год (модель *MP1-ESM1-2LR_ssp245_r1i1p1f1*)

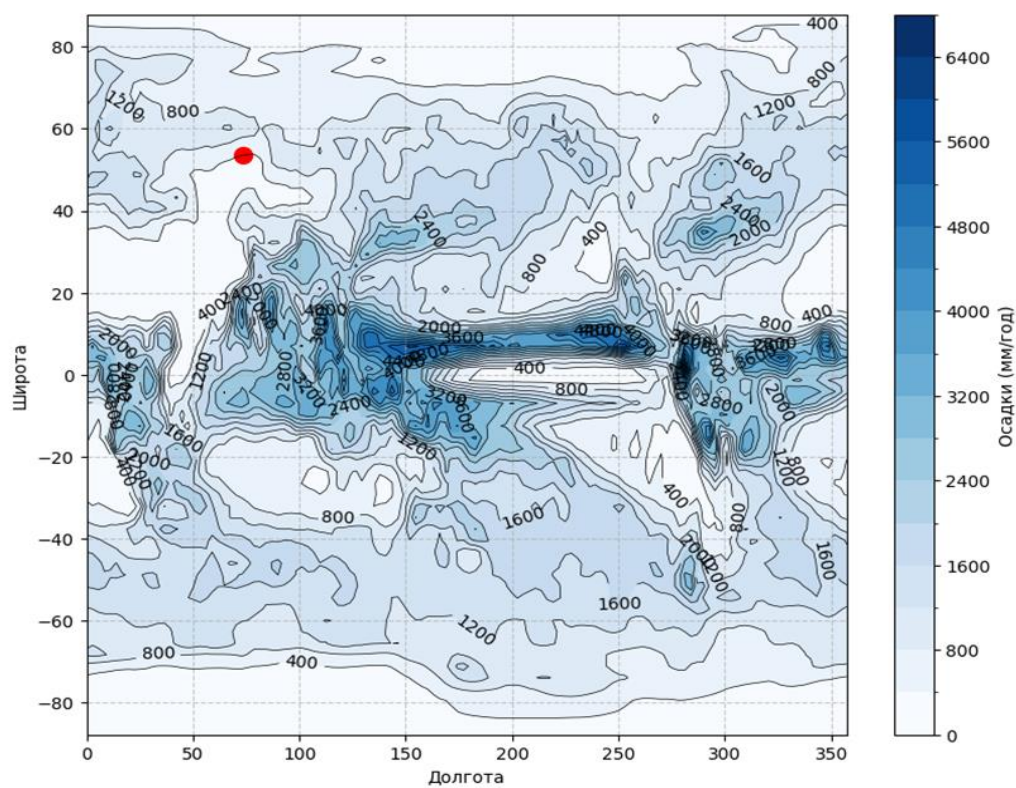


Рисунок 2.8 – Карта осадков на 2050 год (модель *CanESM5_ssp245_r4i1p2f1*)

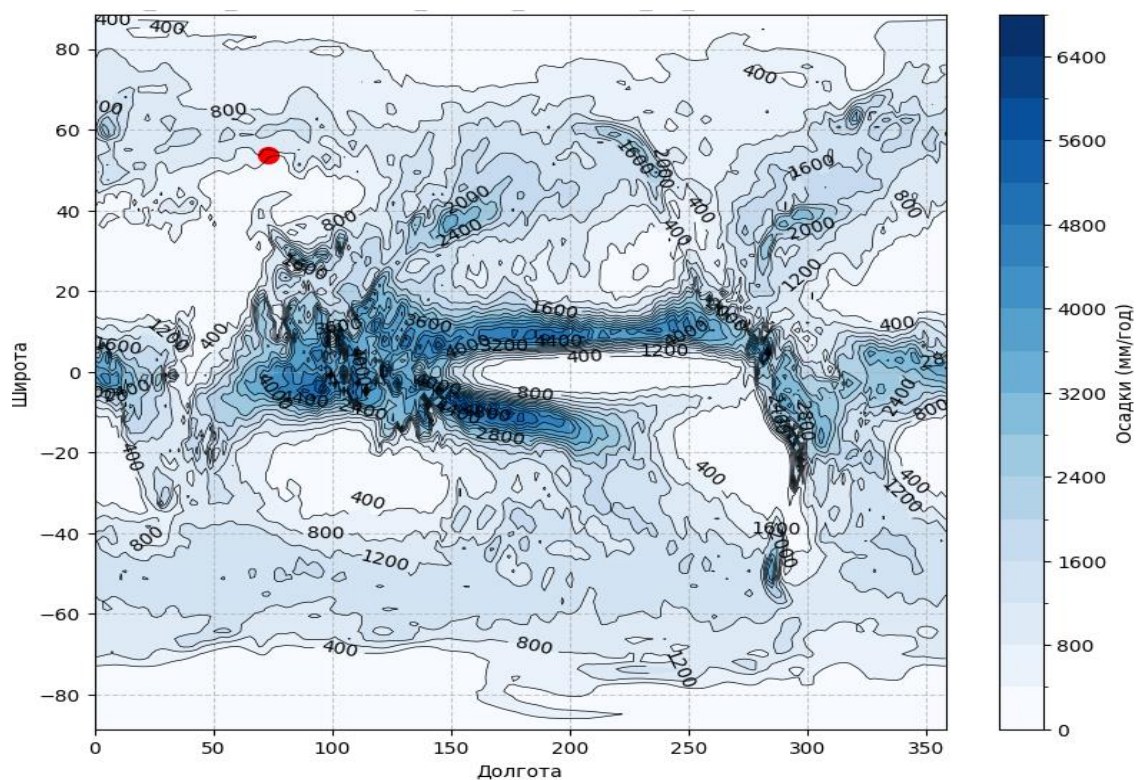


Рисунок 2.7 – Карта осадков на 2050 год (модель *MP1-ESM1-2LR_ssp370_r1i1p1f1*)

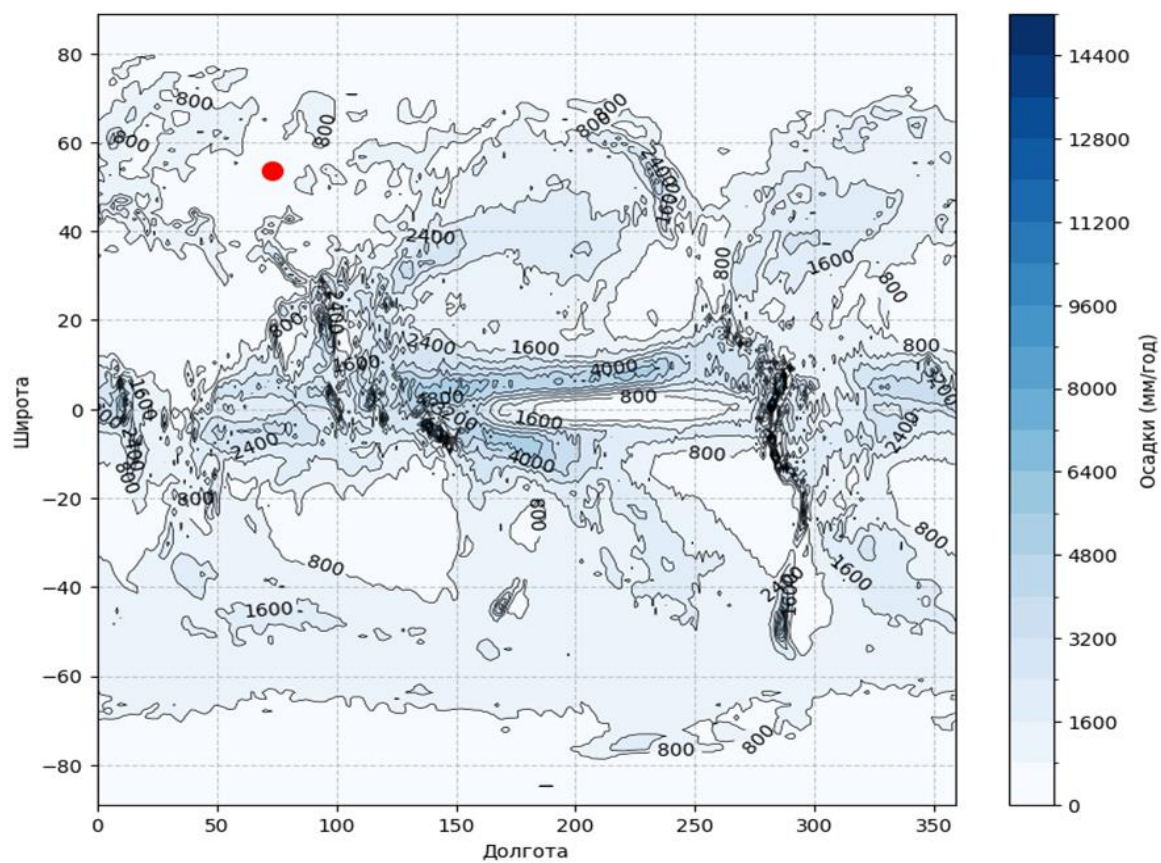


Рисунок 2.8 – Карта осадков на 2050 год (модель *CanESM5_ssp370_r3i1p1f1*)

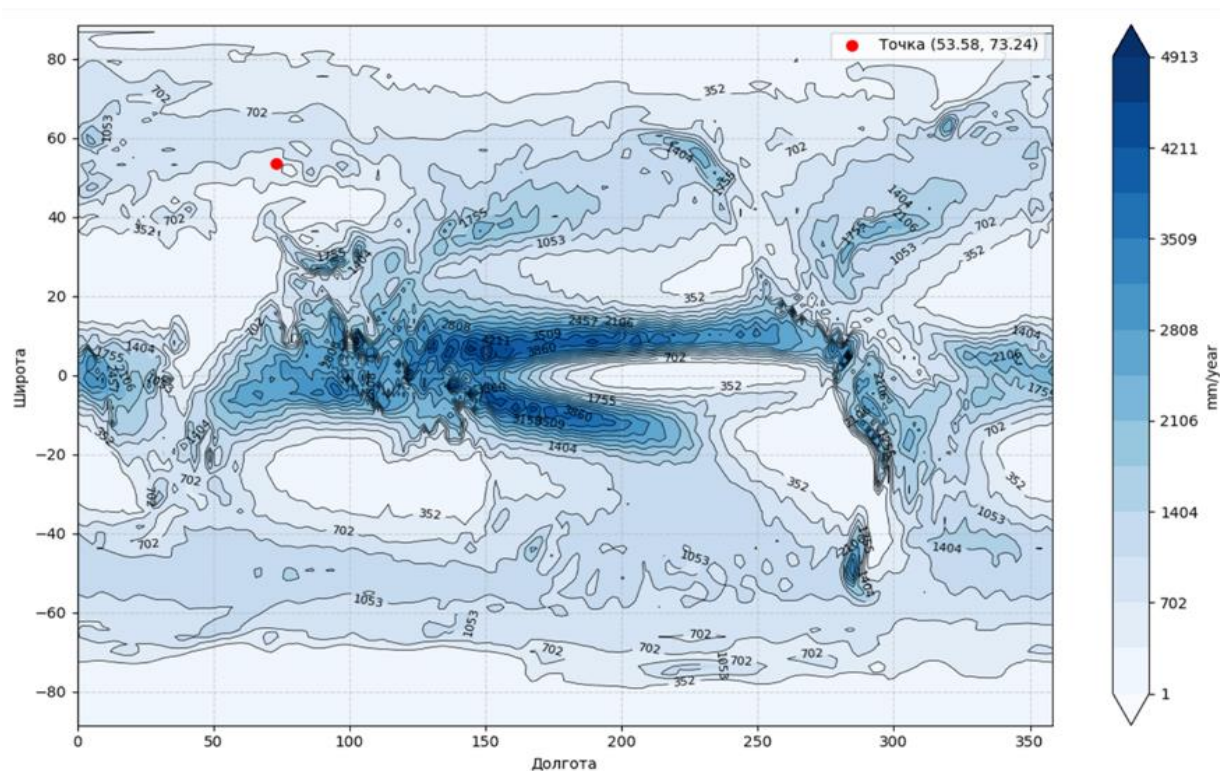


Рисунок 2.9 – Карта осадков на 2050 год (модель *MP1-ESM1-2LR_ssp585_r1i1p1f1*)

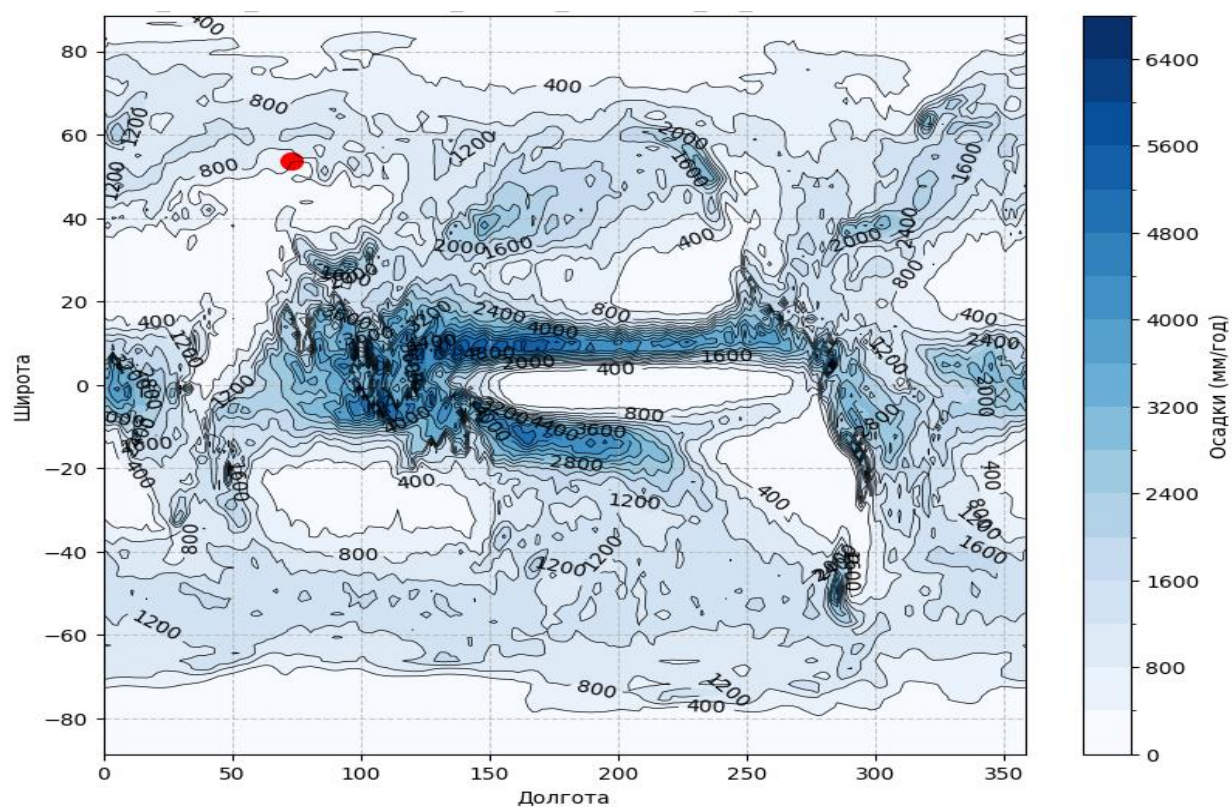


Рисунок 2.10 – Карта осадков на 2050 год (модель *CanESM5_ssp585_r3i1p1f1*)

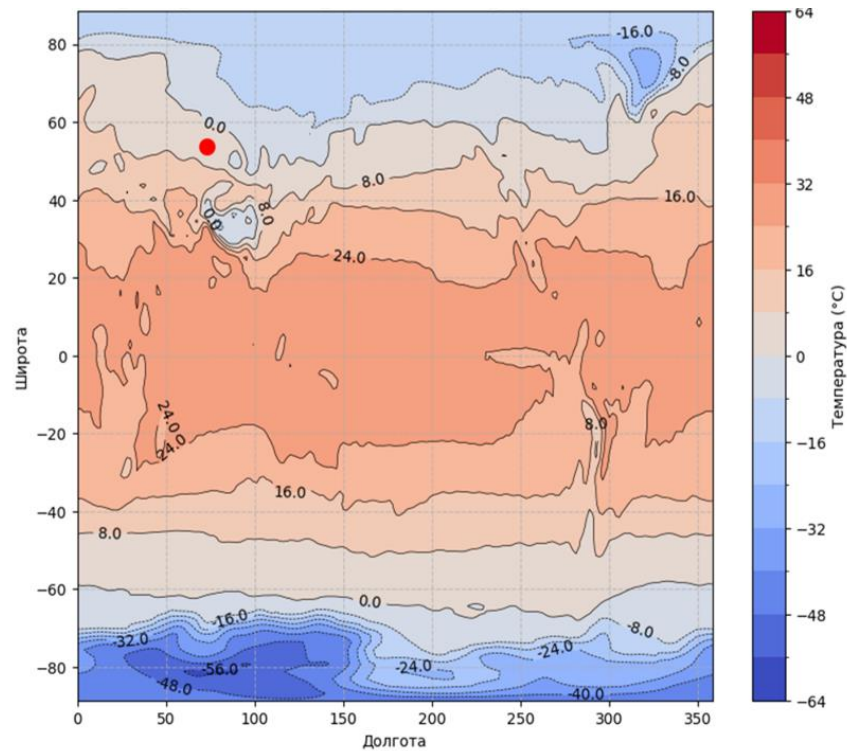


Рисунок 2.11 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *MP1-ESM1-2LR_ssp126_r1i1p1f1*)

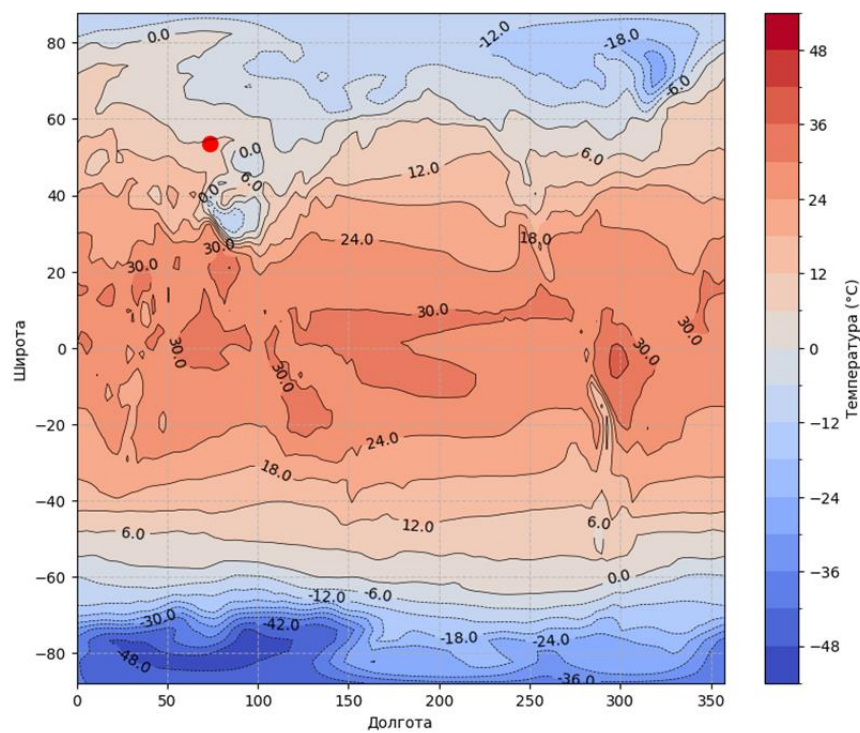


Рисунок 2.12 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *CanESM5_ssp126_r3i1p1f1*)

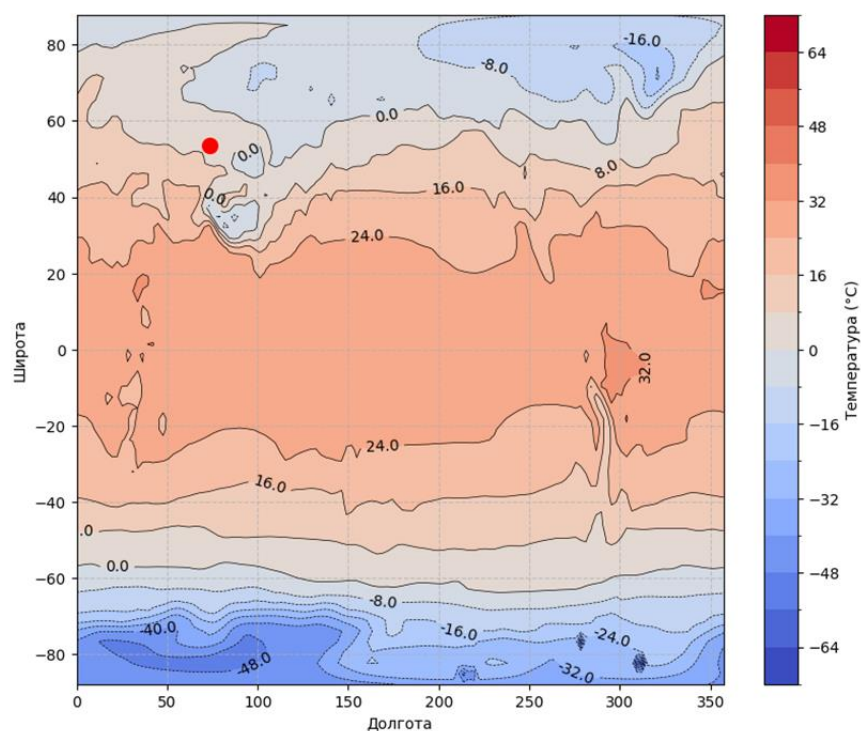


Рисунок 2.13 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *CanESM5_ssp245_r7i1p1f1*)

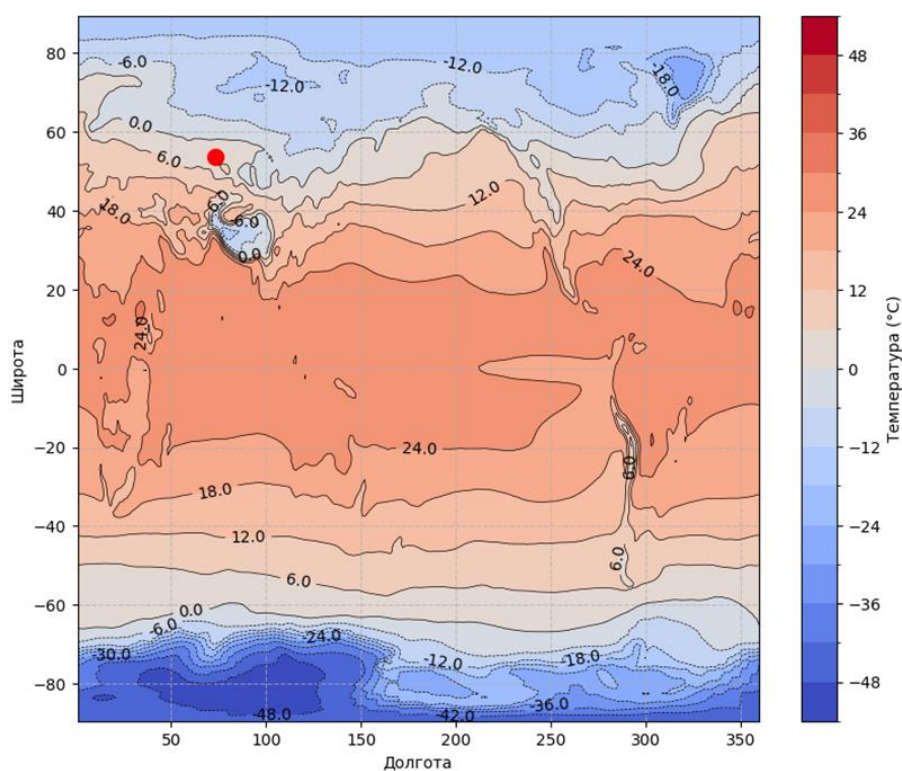


Рисунок 2.14 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *MP1-ESM1-2LR_ssp245_r1i1p1f1*)

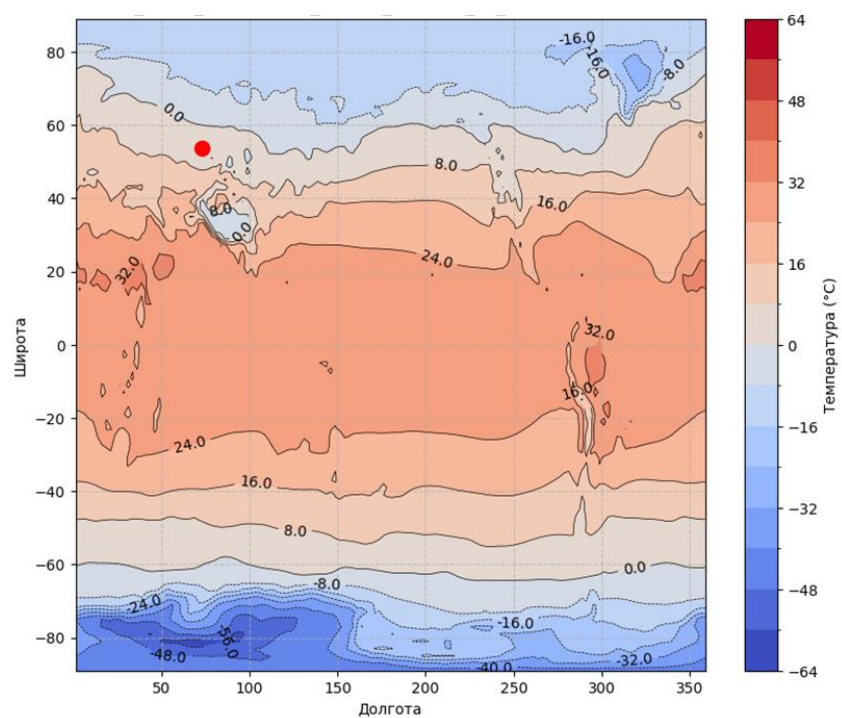


Рисунок 2.15 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *MP1-ESM1-2LR_ssp327_r1i1p1f2*)

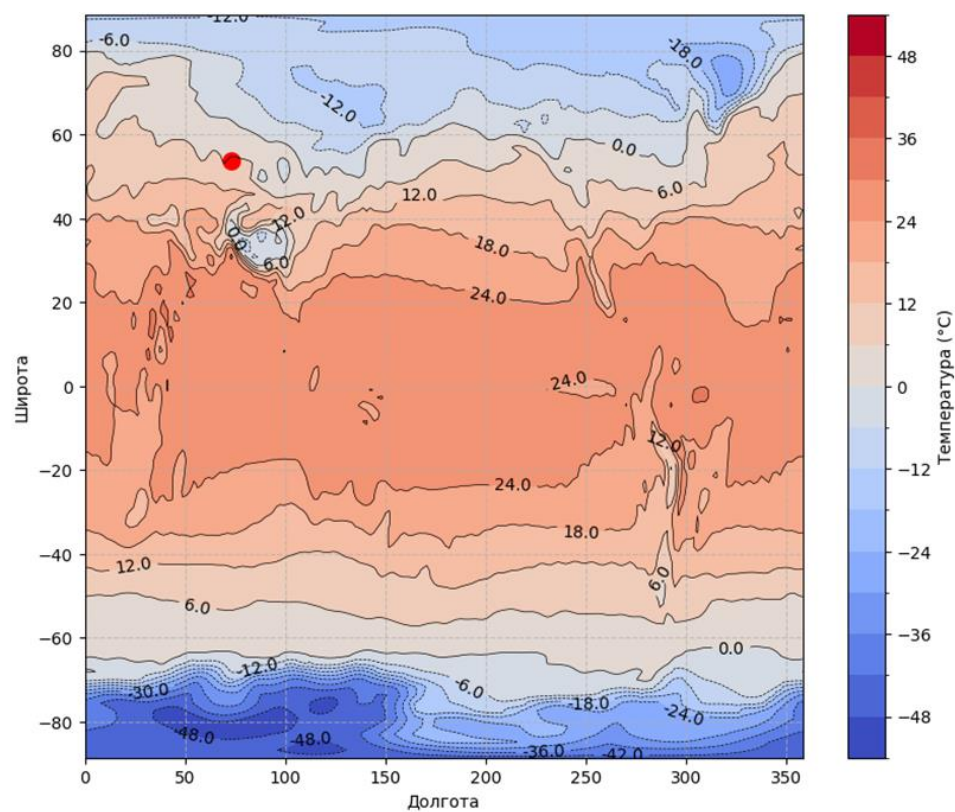


Рисунок 2.16 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *CanESM5_ssp327_r4i1p1f1*)

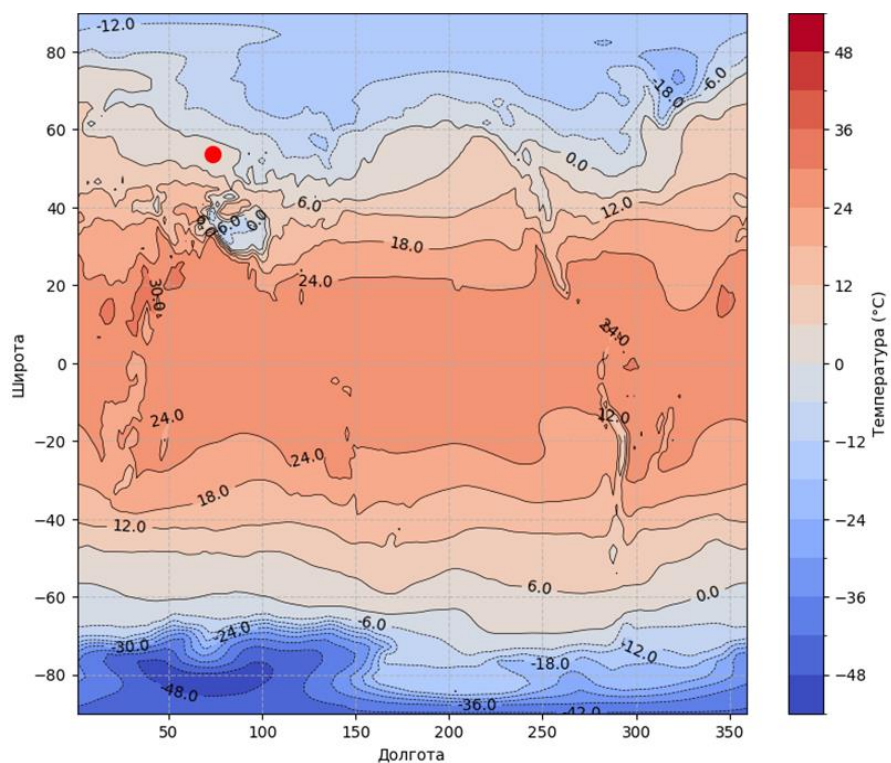


Рисунок 2.17 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *CanESM5_ssp585_r4i1p1f1*)

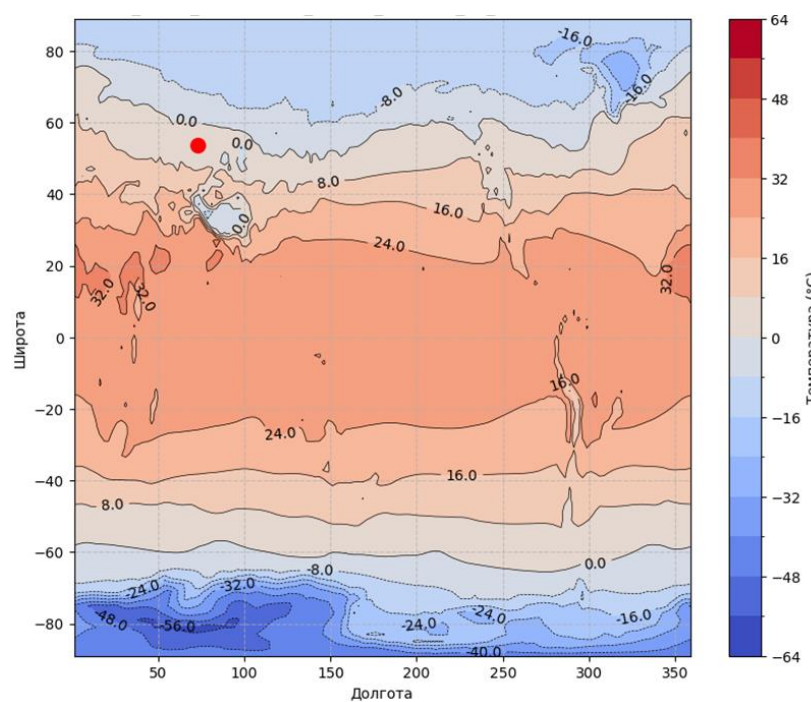


Рисунок 2.18 – Карта приземной температуры воздуха на 2050 год (модель *MPI-ESM1-2LR-ssp585_r1i1p1f1*)

В Таблице 2.1 представлены значения температуры воздуха и осадков для некоторых моделей, можно заметить, что в данных присутствует большой разброс. Температура в некоторых случаях имеет высокое значение, а осадки, наоборот низкое.

Таблица 2.1 – Значения сценарных осадков и температуры воздуха для разных моделей

Модель	T, °C				Осадки, мм			
	SSP1	SSP2	SSP3	SSP5	SSP1	SSP2	SSP3	SSP5
	- 2.6	- 4.5	- 7.0	- 8.5	- 2.6	- 4.5	- 7.0	- 8.5
<i>CanESM</i> 5	5.7	7.0	7.30	4.5	450	465	510	500
<i>MPI-ESM1-2-HR</i>	3.9	4.3	3.55	3.4	499	702	497	452
<i>NESM3</i>	3.3	6.0	5.6	4.9	813	523	564	513
<i>KACE-1-0-G</i>	3.0	4.7	7.5	8.1	440	630	513	512
<i>MIROC6</i>	4.3	4.3	6.08	7.2	499	752	347	488
<i>EC-Earth3</i>	1.2	6.6	3.1	10.3	473	746	407	381
Среднее	5.57	7.7	5.8	6.1	507	663	557	528

3 Существующие методы расчета характеристик годового стока

3.1 Статистические методы

Для проведения водохозяйственных расчетов, необходима статистическая оценка данных. Статистические методы расчета используют для расчета характеристик стока. Они основываются на теории вероятности.

В последнее время стали активно разрабатываться более современные методы, которые позволяют получать надежные прогнозы. Они основаны на использовании методов статистического анализа, моделировании случайных стационарных и нестационарных процессов, а также анализ больших объемов данных.

Впервые вопрос о вероятностных характеристиках многолетних колебаний стока был поднят Д.И. Кочериным в 1928 году на II гидрологическом съезде в Ленинграде. После этого были выпущены первые обобщения данных наблюдений за гидрологическим режимом были представлены в виде карт для всей территории СССР. Не было придумано единой формулировки для разработки методов расчета и определений для характеристик стока. Под одним и тем же названием принимались характеристики, имеющие различный физический смысл и несравнимые между собой, поэтому встал вопрос создания единой системы. Разработанная система называется Единая система методов расчета характеристик стока. Она позволяет обеспечивать единообразие в гидрологических расчетах.

В Единая система используются общие понятия о принципах и методах расчета гидрологических характеристик, что позволяет сравнивать результаты, полученные различными организациями и учеными. В систему включены методы расчета расхода воды, определения уровней воды, гидрографических характеристик водных объектов и других параметров.

В России Единая Система является основным методом расчета характеристик стока и широко применяется в практике гидрологических и инженерно-изыскательных работ.

На начальном этапе развития методов моделирования основных характеристик стока (таких как годовой, минимальный и максимальный сток) были сформулированы ключевые положения. Многолетние ряды характеристик стока являются совокупностями независимых случайных величин. Они подчиняются вероятностным законам распределения. Распределение случайных величин, в данном случае, соответствует трехпараметрическим асимметричным законам распределения вероятностей. Обычно используются гамма-распределение и логнормальное распределение. Процесс изменения стока носит стационарный характер, то есть его основные характеристики остаются неизменными на протяжении всего периода времени.

Все указанные положения были подтверждены ретроспективным анализом данных, накопленных на большинстве крупных рек. Однако, начиная примерно с середины девяностых годов XX века, наблюдаются устойчивые тенденции отклонений ключевых климатических показателей (среднегодовая температура и сумма атмосферных осадков) от ранее установленных норм.

Существует множество видов гидрологических моделей, включающих в себя климатические характеристики.

Для агрегирования всех существующих методов, были разработаны «Методические рекомендации по оценке обеспеченных затрат на проектируемые гидротехнические сооружения в условиях нестабильного климата» [21], в дополнение к СП 33-101-2003.

В них описывается методика расчёт коэффициента k , который выполняет роль связующего звена для климата и речного стока.

На сегодняшний день, основным недостатком существующих методов расчета характеристик стока является недостаточная точность определения характеристик. Это связано, с относительно короткой длиной ряда данных наблюдений. Существующие методы не всегда учитывают все факторы, влияющие на формирование стока, такие как климатические изменения, изменения рельефа и гидрологические особенности бассейна. Кроме того, ряд методов основан на статистических расчетах, что ограничивает их применение для учета меняющихся условий.

Для более точного определения характеристик необходимо разработать новые методы либо усовершенствовать старые. Требуется усовершенствование стохастических гидрологических моделей, создание региональных методик, дистанционное зондирование. Эти методы позволяют учитывать все факторы, влияющие на сток, и работать с большим объемом данных, что повышает точность прогнозирования.

3.2 Балансовые модели

Многие гидрологические модели используются для долгосрочной оценки гидрологических последствий изменения климата.

Балансовые модели прогнозирования речного стока – это математические модели, основанные на законе сохранения водной массы в гидрометеорологической системе. В качестве входных параметров используются данные о поступающих и исходящих «потоках воды», а также о запасах воды в водоносных горизонтах почвы для прогнозирования объема речного стока. Балансовые модели могут использоваться для краткосрочных и долгосрочных прогнозов. Они широко используются в гидрологии для моделирования опасных и неблагоприятных явлений.

Балансовые модели бывают различного уровня и позволяют описывать водный баланс различных гидрологических систем:

- Глобальный водный баланс. Закон водного баланса означает, что приток воды равен оттоку. В идеальной системе их разница должна быть равна нулю. В масштабных процессах, для упрощения расчетов потери не учитываются.
- Модели водного баланса речного бассейна – эти модели учитывают приходные и расходные составляющие, влияющие на сток в бассейне реки, а также запасы воды в почве и на поверхности. Данные модели позволяет сделать адекватный прогноз для конкретных водосборов рек.
- Модели водного баланса рек – эти модели региональные и учитывают приток воды в реку и отток из нее.
- Модели водного баланса озера – эти модели описывают водообмен и циркуляцию воды в озерах и водохранилищах.

Выбор конкретной модели зависит от объекта исследования, доступности данных и характеристик бассейна [16].

3.3 Динамические модели

Климатическая составляющая оценивается по результатам расчетов глобального объединенных моделей общей циркуляции атмосферы и океана или палеоклиматической реконструкции. Модели общей циркуляции атмосферы и океана основаны на дифференциальных уравнениях в частных производных. Эти модели содержат динамические компоненты, описывающие взаимодействие внутри системы, атмосфера – океан. МОЦАО входят в глобальные модели *CMIP6*.

Большинство гидрологических моделей основываются на системах уравнений водного баланса с различными временными интервалами.

Перед началом работы гидрологическая модель калибруется по данным ретроспективных наблюдений. Во время калибровки происходят

преобразования рассчитанных вероятностных значений в значения наиболее близкие к фактическим [16]. Затем по данным ансамблевых моделей климатических сценариев с необходимым временным разрешением, моделируется гидрологический сток.

Подобные модели, которые описываются несколькими параметрами, называются многопараметрическими динамическими. Они имеют распределенные параметры и описывают процессы преобразования осадков в сток. В таких моделях учитываются потери на испарения и др.

По мере усложнения физических моделей требуется более сложный математический аппарат и большой объем исходных данных. Кроме того, большое количество параметров требует больше времени для калибровки и увеличивает общие погрешности расчетов.

Динамические физико-математические модели различной сложности описания используются в практике оперативного прогнозирования для составления краткосрочных и долгосрочных прогнозов [16]. Например, европейская модель SWAT.

Для предсказания поведения систем, состоящих из случайных величин, используются модели учитывающие «Стохастичность» в моделях формирования стока. Одним из таких методов является моделирование стохастических временных рядов, которое позволяет учитывать случайные факторы, такие как изменения погодных условий и другие параметры, которые могут повлиять на формирование стока. Стохастические модели используются для описания случайных процессов.

Еще одним методом, использующимся для описания случайных процессов, является метод, основанный на марковском процессе. Они позволяют учитывать зависимость текущих значений стока без учета влияния предыдущих значений, а также учитывать случайные факторы, влияющие на сток.

Также используются методы Монте-Карло и многомерный статический анализ, которые позволяют моделировать случайные процессы и получать вероятностные оценки прогнозируемых значений стока [7].

Все вышеперечисленные методы позволяют учесть «стохастичность» в процессах формирования стока и прогнозирования гидрологических кривых, что позволяет делать более точные прогнозы и учитывать возможные риски и неопределенности.

Для речных водосборов, расположенных на территориях с высокими значениями многолетней температуры и низкими, сумма осадков, необходимо использовать модели, учитывающие потери на испарение. Для таких рек испарение, является важнейшей водобалансовой составляющей после стока. Для расчета испарения используются методы энергетического баланса или аэродинамические. Основными параметрами, определяющими величину испарения, являются такие климатические характеристики окружающей среды, как температура и влажность воздуха, осадки, скорость ветра и величина солнечной радиации. Многие модели позволяют учесть испарение, например: Модель *GR4H*, которая в качестве исходной информации использует данные об осадках и испаряемости; Шведская модель *HBV*, в качестве исходных данных осадки и температуру воздуха; Модель «Сакраменто», уникальная модель, учитывающая влагозапасы почвы.

Большинство моделей в своей основе содержат базовую стохастическую модель формирования речного стока. Ее ядром является дифференциальное уравнение первого порядка []:

$$\frac{dQ}{dt} = - \left(\frac{1}{k \cdot \tau} \right) Q + \frac{X}{\tau} \quad (3.1)$$

где Q – скользящие осредненные характеристики стока (расходы воды, модули или слой) в замыкающем створе речного бассейна;

- k – коэффициент стока, которому может придаваться разный смысл в зависимости от гидрологического режима реки (он может быть постоянным, так и меняться в зависимости от факторов подстилающей поверхности – залесенность берегов, заболоченность, степень урбанизации и гидрометеорологические факторы – интенсивности осадков и температуры воздуха T °C);
- τ – время релаксации речного бассейна, соответствующее корреляционному критерию – как правило в стохастических моделях принимается за один год.

Если мы учтем преобразования и добавим шумы в уравнение (3.1), то получим стохастическое дифференциальное уравнение, которое является линейной моделью:

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt, \quad (3.2)$$

где $\bar{c}, \bar{N}$ – математические ожидания;

$\tilde{c}, \tilde{N}$ – коррелированные друг с другом белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}, \tilde{N}}$;

Для упрощения мы преобразуем систему уравнений (3.2) на статистически эквивалентное ему уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК), которое описывает марковскую эволюцию плотности вероятности $p(Q, t)$ []:

$$\frac{\partial p(Q;t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial Q} (A(Q;t)p(Q;t)) + 0.5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2} (B(Q;t)p(Q;t)) \quad (3.3)$$

где A и B – коэффициенты сноса и диффузии, определяющие физико-статистическими параметрами, входящими в уравнение (3.2).

Одним из основных доводов в пользу того, что модель (3.3) позволяет точно описать процесс формирования многолетнего стока, является факт того, что в случае стационарности гидрологическая модель переходит в уравнение Пирсона:

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2} p \quad (3.4)$$

Из-за недостаточно длинных рядов наблюдения, в гидрологии ограничиваются 3-4 моментами вероятностных распределений. Чаще всего систему аппроксимируют (3.3) системой дифференциальных уравнений для начальных моментов m_i []:

$$dm_1/dt = -(\bar{c} - 0.5 G_{\bar{c}})m_1 - 0.5 G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0.5 G_{\bar{c}})m_1 - 0.5 G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1.5 G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7.5 G_{\bar{c}\bar{N}}m_2 + 3G_{\bar{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2 G_{\bar{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14 G_{\bar{c}\bar{N}}m_3 + 6G_{\bar{N}}m_2. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Этой системы уравнений вполне достаточно для определения всех расчетных гидрологических характеристик [3].

Перед проведением моделирования необходимо оценить эффективность прогнозов стока. Для этого используют критерий, основанный на данных, рассчитанных прогностической методикой в сравнении с ретроспективными данными. Однако при учете климатических изменений этот критерий перестает работать, исходя из правил классической статистики. Для того,

чтобы климатический прогноз был обоснован, различия в параметрах кривых распределения (прогностических и эмпирических) должны быть небольшими и статистически незначимыми.

Предлагается использовать в качестве критерия оценки коэффициент корреляции, определение относительной ошибки прогноза, среднеквадратичной ошибки, коэффициент детерминации и другие. Кроме того, могут быть использованы критерии, основанные на сравнении распределений прогнозируемых и наблюдаемых значений, например, критерий Колмогорова–Смирнова или критерий χ -квадрат.

4 Анализ гидрометеорологических данных

4.1 Проверка рядов на однородность и значимость

Для проведения корректного моделирования стока необходимо проверить исходные данные на однородность и значимость. В случае их неоднородности результаты анализа могут оказаться искаженными или неправильно интерпретированными. После разделения временного ряда на части, основываясь на выявленной точке перелома также необходимо оценить однородность и значимость полученных подгрупп.

Для проверки рядов были использованы критерии Стьюдента (t -критерий, для сравнения средних) и Фишера (F -критерий, для сравнения дисперсий). Оценка позволяет определить, есть ли статистически значимые различия между средними значениями двух групп, что особенно важно для выявления отклонений в данных. В свою очередь, F -критерий позволяет оценить равенство дисперсий, что является необходимым условием для применения многих статистических методов.

Однородность в данном контексте означает, что статистические характеристики рядов (среднее и дисперсия) не изменяются значимо во времени. При уровне статистической значимости 5% ($\alpha = 0.05$) проверялось, соответствуют ли вычисленные статистики Фишера и Стьюдента теоретическим значениям, определенным по таблицам критических значений для заданного уровня значимости и числа степеней свободы. Гипотеза об однородности принималась, если значения статистик находились в допустимых пределах, что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий между сравниваемыми участками временного ряда.

$$F^* < F_{2\alpha},$$

$$t^* < t_{2\alpha},$$

где F^*, t^* – эмпирические значения статистик, соответственно Фишера и Стьюдента;

$F_{2\alpha}, t_{2\alpha}$ – теоретические значения статистик, соответственно Фишера и Стьюдента, при уровне значимости $2\alpha = 5\%$.

В работе были определены статистики Фишера и Стьюдента. Расчетные формулы для оценки преобразования Фишера и критерия Стьюдента соответственно:

$$F^* = \frac{D_1}{D_2} \quad (4.1)$$

$$t^* = \left[(\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2) / \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \right] \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \quad (4.2)$$

где D_1 и D_2 – дисперсии по одной и другой частям ряда ($D_1 > D_2$);

σ_1 и σ_2 – среднеквадратические отклонения по первой и второй частям ряда;

$\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$ – средние значения по первой и второй частям ряда;

n_1 и n_2 – длина первой и второй частей ряда.

Таблица 4.1 – Результаты проверки рядов среднегодовых слоев сток на однородности при $2\alpha = 5\%$ и $r(1) = 0$

Река – пост	$ t^* $	$t_{2\alpha\%}$	H_0	F^*	$F_{2\alpha\%}$	H_0
Омь – с. Крещенка	1,34	2,00	не опр.	1,27	2,16	не опр.
Омь – с. Чумаково	1,51	2,02	не опр.	1,04	2,82	не опр.
Омь – г. Куйбышев	1,74	2,04	не опр.	1,02	2,12	не опр.
Омь – с. Вознесенское	0,72	1,99	не опр.	1,36	1,88	не опр.
Омь – г. Калачинск	1,69	1,99	не опр.	2,29	2,70	не опр.
Омь – г. Омск	1,70	2,04	не опр.	1,85	2,69	не опр.
Ишим – г. Ишим	1,06	2,01	не опр.	1,36	2,12	не опр.

Ишим – с. Викулово	1,70	2,03	не опр.	2,31	2,78	не опр.
Ишим – с. Орехово	1,60	2,01	не опр.	2,14	2,86	не опр.

В результате проведенного анализа, можно сделать вывод, что все гидрологические ряды по гидрологическим постам статистически однородны как по средним значениям, так и по дисперсии. Можно сделать вывод, что ряд разделен на группы корректно. Данные можно использовать для анализа в дальнейшем.

4.2 Оценка значимости линейного тренда

Оценка значимости линейного тренда проводится с использованием критерия значимости выборочного коэффициента корреляции Пирсона (R). Оценка позволяет сделать статистически обоснованный вывод о наличии или отсутствии линейной зависимости. Тренд считается статистически незначимым, если выполняется условие:

$$\frac{|R|}{\sigma_R} < t_{2\alpha}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{1-R^2}{N-2}}$$

где $t_{2\alpha}$ – Статистика Стьюдента при уровне значимости $2\alpha = 5\%$;

σ_R – стандартная ошибка коэффициента корреляции;

N – число наблюдений;

R – коэффициент корреляции

Из-за того, что общий тренд полного ряда может быть не репрезентативен, была произведена оценка для ряда данных, включающих 32 года наблюдений.

Таблица 4.2 – Результаты оценки значимости линейного тренда

Река – пост	N	R^2	R	σR	$ R / \sigma R$	$t_{2\alpha=5\%}$	$H_0: R=0$
Омь – с. Крещенка	59	0,06	0,24	0,18	1,33	2,04	не опр.
Омь – с. Чумаково	59	0,33	0,57	0,15	3,84	2,04	опр.
Омь – г. Куйбышев	82	0,22	0,47	0,16	2,9	2,00	опр.
Омь – с. Вознесенское	70	0,11	0,33	0,17	1,93	2,02	не опр.
Омь – г. Калачинск	82	0,23	0,48	0,16	2,99	2,00	опр.
Омь – г. Омск	59	0,23	0,48	0,16	2,99	2,04	опр.
Ишим – г. Ишим	70	0,07	0,26	0,18	1,50	2,02	не опр.
Ишим – с. Викулово	70	0,16	0,40	0,17	2,30	2,02	опр.
Ишим – с. Орехово	59	0,2	0,45	0,16	2,74	2,00	опр.

В результате оценки ряда на значимость линейных трендов можно сделать вывод, что на большинстве гидрологических постах тренд статистически значим, так-как соотношение коэффициента корреляции и стандартной ошибки превышает критическое значение. Стоит отметить, что на посту р. Омь – с. Чумаково наблюдается наибольшая связь ($R = 0,57$), значит изменение стока на нем неслучайны и имеют общую тенденцию.

На ГП р. Омь – с. Крещенка, р. Омь – с. Вознесенское, р. Ишим – с. Ильинка, р. Ишим – г. Ишим тренд незначим. Ранее был произведен анализ рядов на однородность и стационарность, который показал положительный результат. Возможно, в гидрологических данных на четырех постах есть нелинейные кратковременные изменения, которые не нарушают стационарность и однородность ряда.

4.3 Анализ корреляции слоя стока с суммой осадков

Осадки являются одним из основных факторов, влияющих на формирование стока. Оценка корреляции между осадками и стоком проводится для понимания степени связи между этими характеристиками. Цель этого анализа – выявить, насколько количество выпадающих осадков влияет на объем воды, формирующий сток в реках.

Для того чтобы правильно верифицировать гидрологические модели, необходимо грамотно подобрать метеорологическую станцию. В дальнейшем данные об осадках будут использоваться при параметризации модели.

На рассматриваемой территории функционируют три метеорологических станции: МС г. Омск, МС г. Ишим, МС г. Новосибирск.

После оценки связи между стоком и осадками, для каждого гидрологического поста были выбраны метеостанции, коэффициент корреляции с которыми наиболее высокий.

Таблица 4.3 – Коэффициенты корреляции между годовыми осадками и расходами воды

Река – пост	Метеостанция	R
Омь – с. Крещенка	г. Омск	0,33
Омь – с. Чумаково	г. Омск	0,59
Омь – г. Куйбышев	г. Омск	0,53
Омь – с. Вознесенское	г. Омск	0,60
Омь – г. Калачинск	г. Омск	0,47
Омь – г. Омск	г. Омск	0,78
Ишим – г. Ишим	г. Ишим	0,73
Ишим – с. Викулово	г. Ишим	0,35
Ишим – с. Орехово	г. Ишим	0,24

4.4 Статистическая обработка данных

Относительные погрешности рассчитываются по формулам:

– для среднего значения

$$\varepsilon_{Q\%} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} 100\% \quad (4.3)$$

– для коэффициента вариации

$$\varepsilon_{C_v} = \frac{C_v}{n+4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1+C_v^2)}{2}} 100\% \quad (4.4)$$

– для коэффициента асимметрии

$$\varepsilon_{C_s} = \frac{1}{C_s} \sqrt{\frac{6}{n}(1+6C_v^2+5C_v^4)} 100\% \quad (4.5)$$

где C_v – коэффициент вариации;

C_s – коэффициент асимметрии;

n – длина гидрологического ряда

Оценка погрешностей статистических характеристик производится для количественного определения точности исходных данных. Чем выше длина ряда наблюдений, тем меньше погрешность. В работе исходный ряд имеет относительно небольшую длину, что приводит к повышению погрешностей.

Таблица 4.4 – Расчет погрешностей многолетних слоев стока

Река – Пост	h	σ	C_s	C_v	C_s/C_v	εQ	εC_v	εC_s
Омь – с. Крещенка	91	32	0,09	0,35	0,26	6,19	4,5	58
Омь – с. Чумаково	85	32	0,13	0,38	0,34	6,72	4,6	43
Омь – г. Куйбышев	75	30	0,15	0,39	0,37	6,89	4,9	43
Омь – с. Вознесенское	59	23	0,04	0,38	0,09	6,72	4,6	18
Омь – г. Калачинск	37	19	0,67	0,53	1,24	9,37	6,63	64
Омь – г. Омск	36	19	0,28	0,52	0,49	9,19	6,5	154
Ишим – г. Ишим	16	11	0,73	0,67	1,08	11,8	8,35	59
Ишим – с. Викулово	18	5	0,25	0,26	1,01	4,59	3,25	173
Ишим – с. Орехово	15	5	0,75	0,36	2,09	6,36	4,5	58

В результате статистического анализа можно сделать вывод, что гидрологический режим на реках Ишим и Омь значительно различается, хотя обе реки принадлежат одному водосбору и имеют схожие физико-географические условия. На реке Омь относительно стабильный режим, у слоя стока умеренная асимметрия распределения и вариативность, особенно в верхнем течении.

Река Ишим характеризуется значительными колебаниями стока, с пространственной неоднородностью. Высокое значение коэффициентов асимметрии и вариации, особенно на ГП р. Ишим – г. Ишим, говорит о значительных межгодовых колебаниях.

5 Расчет статистических характеристик многолетнего стока на ретроспективном материале

5.1 Исходные данные

Для начала работы необходимо проанализировать многолетние данные о стоке на водосборе. В рамках данного анализа выделяются два расчетных периода. После этого проводится расчет средних значений температуры, годовых сумм осадков и слоя стока для каждого из указанных периодов.

В 1990-х годах произошло изменение в речном стоке, которое могло быть вызвано различными факторами, включая изменение климатических условий [16].

На графике динамики стока за весь период наблюдения, прослеживается явная точка перелома. Для дальнейшего использования данных, необходимо провести разделение ряда на однородные части с устойчивым линейным трендом в каждой.

Вероятно, разделение связано с климатическими изменениями, которые в последние 20 лет оказывают существенное влияние на гидрологический режим рек.

Представленные графики демонстрируют усиление тенденции к снижению стока после 1990-х (Рисунки 5.1, 5.3). Изменение стока указывает на нарушение однородности гидрологического режима, связанное с климатическими изменениями или антропогенной нагрузкой. На всех гидрологических постах была определена точка перелома. Изменения в ходе тренда наблюдаются после 1990 года, поэтому ряд был разделен на два периода (до и после перелома) (Рисунки 5.2, 5.4). Такой подход позволяет минимизировать статические ошибки при моделировании речного стока.

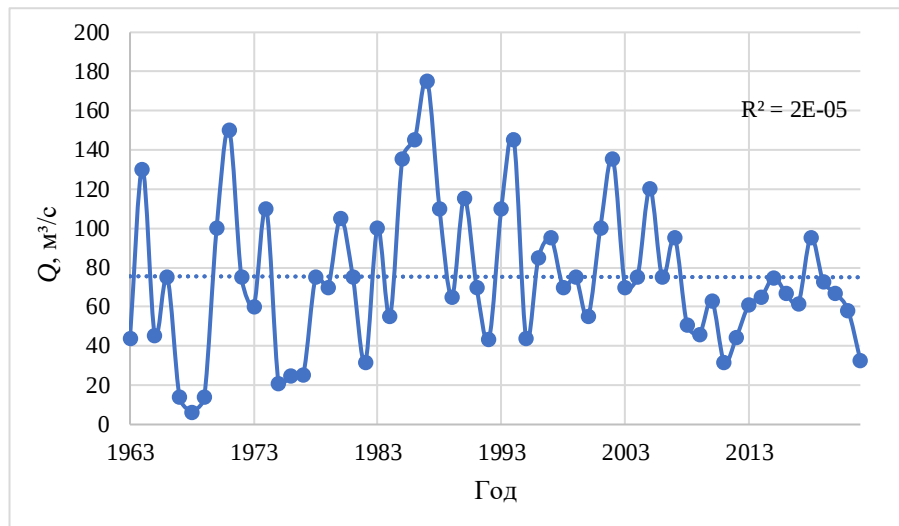


Рисунок 5.1 – Гидрограф ГП р. Ишим – с. Орехово

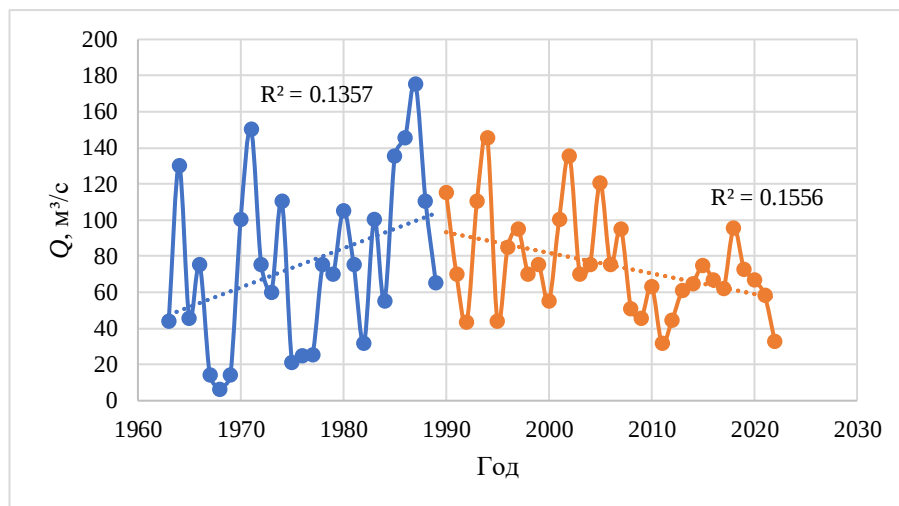


Рисунок 5.2 – Разделение временного ряда на компоненты (ГП р. Ишим – с. Орехово)

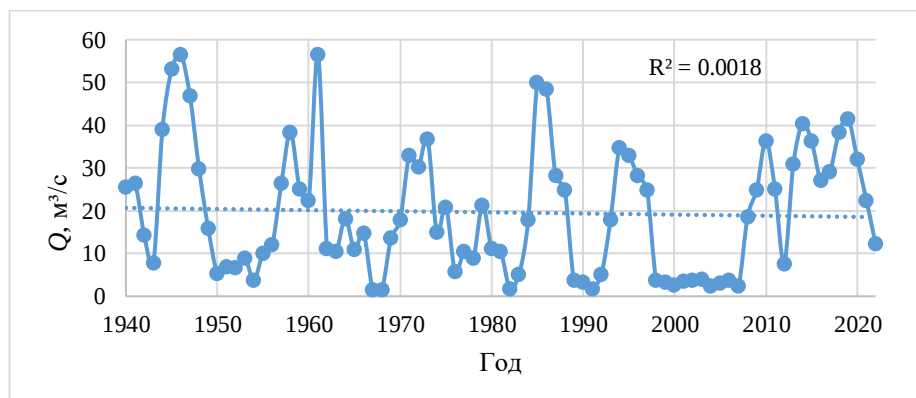


Рисунок 5.3 – Гидрограф ГП р. Омь – г. Калачинск

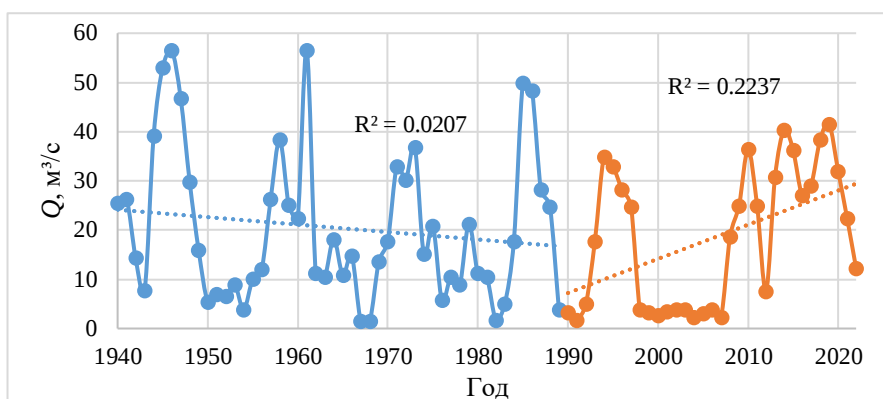


Рисунок 5.4 – Разделение временного ряда на компоненты (ГП р. Омь – г. Куйбышев)

Анализ графиков показал, что не на всех гидрологических постах наблюдается значимая линейная зависимость расходов воды. В работе также проведена оценка корреляционной связи.

Исходя из хронологических графиков суммы осадков на исследуемых метеостанциях, можно сделать вывод о том, что произошли резкие изменения. (Рисунок 5.5). Поэтому было выделено два расчетных периода с начала наблюдений по 1989 и с 1990 по 2022 год.

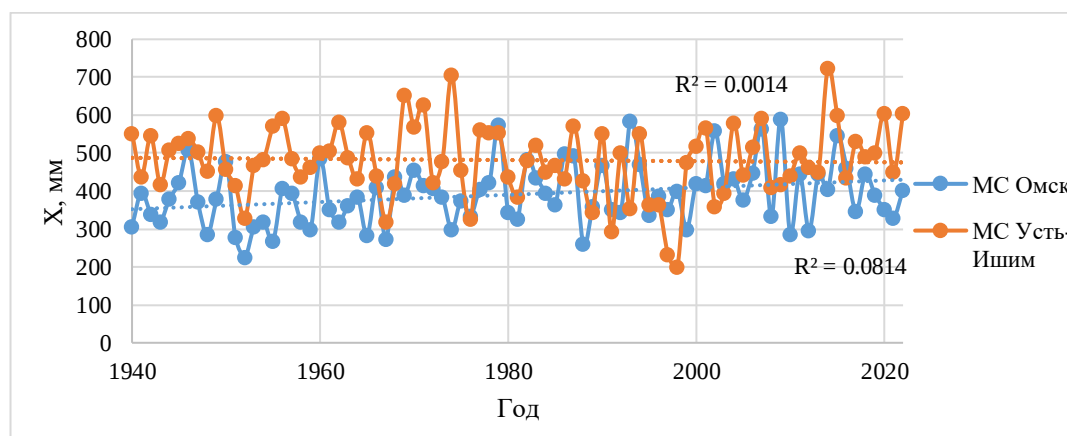


Рисунок 5.5 – Хронологические графики суммы осадков (МС Омск и МС Усть-Ишим)

Для двух временных интервалов для каждого водосбора были определены параметры внешнего воздействия на модель (Таблицы 5.1.1 – 5.1.2).

Таблица 5.1.1 – Средние значения температуры, годовых сумм осадков и слоя стока река Омь

ГП р. Омь – с. Крещенка			ГП р. Омь – с. Чумаково		
Период	1963–1989	1990–2022	Период	1963–1989	1990–2022
$\bar{T}$	1,2	2,3	$\bar{T}$	1,2	2,3
C_v	0,78	1,10	C_v	0,82	0,61
$\bar{X}$	392	415	$\bar{X}$	392	415
$\bar{h}$	65	50	$\bar{h}$	51	60
ГП р. Омь – г. Куйбышев			ГП р. Омь – с. Вознесенское		
Период	1940–1989	1990–2022	Период	1963–1989	1990–2022
$\bar{T}$	1,1	2,3	$\bar{T}$	1,2	2,3
C_v	0,76	0,78	C_v	0,75	0,61
$\bar{X}$	374	415	$\bar{X}$	386	415
$\bar{h}$	39	36	$\bar{h}$	38	29
ГП р. Омь – г. Калачинск			ГП р. Омь – г. Омск		
Период	1940–1989	1990–2022	Период	1963–1989	1990–2022
$\bar{T}$	1,1	2,3	$\bar{T}$	1,2	2,3
C_v	0,78	0,53	C_v	0,69	0,6
$\bar{X}$	374	415	$\bar{X}$	392	415
$\bar{h}$	37	36	$\bar{h}$	33	43

Таблица 5.1.2 – Средние значения температуры, годовых сумм осадков и слоя стока река Ишим

ГП р. Ишим – с. Викулово			ГП р. Ишим – г. Ишим		
Период	1963–1989	1990–2022	Период	1963–1989	1990–2022
$\bar{T}$	1,5	2	$\bar{T}$	1,5	2

ГП р. Ишим – с. Викулово			ГП р. Ишим – г. Ишим		
Период	1963–1989	1990–2022	Период	1963–1989	1990–2022
C_v	0,62	0,20	C_v	0,67	0,63
$\bar{X}$	485	470	$\bar{X}$	485	470
$\bar{h}$	20	13	$\bar{h}$	17	11
ГП р. Ишим – с. Орехово					
Период	1963–1989	1990–2022			
$\bar{T}$	1,5	2			
C_v	0,64	0,63			
$\bar{X}$	485	470			
$\bar{h}$	23	15			

5.2 Расчет по модели формирования многолетнего стока

После задания начальных условий производится идентификация модели формирования стока в виде системы (5.1).

Система (3.5) преобразовывается в две независимые формулы, связывающие статистические уравнения для первого и второго моментов с гидрологическими характеристиками [18]:

$$-\bar{c}m_1 + \bar{N} = 0 \quad (5.1)$$

$$-2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}} = 0$$

Причем, так как мы рассматриваем случайный процесс, как стационарный (среднее и дисперсия не изменяются при смещении по времени), параметр τ сокращается, то $\bar{c} = 1/k$, $\bar{N} = \bar{X}$.

Для расчета используется выражение для коэффициента стока $\frac{k=\bar{Q}}{\bar{X}} = 1 - \frac{\bar{E}}{\bar{X}}$, полученное из уравнения водного баланса для замкнутых речных водосборов. Данный коэффициент показывает, какая доля осадков испаряется и связывается с параметрами, которые присутствуют в климатических сценариях, такими как приземная температура воздуха в градусах Цельсия и количество осадков в миллиметрах, путем использования эмпирических формул для расчета испарения.

Для оптимизации процесса была написана программа на языке *Python*. Программа рассчитана на пакетную обработку гидрометеорологических данных. Алгоритм основан на сравнительном анализе 5 эмпирических формул для испарения Шрайбера, Мезенцева-Тюрка, Ольдекопа, Будыко и Багрова (). Для каждого метода расчета испарения вычисляются: коэффициент стока, статические моменты, коэффициент вариации. Пользователь имеет возможность оценить погрешность рассчитанных C_v и m_1 для каждой модельной реализации и выбрать наилучшую формулу для конкретных гидрометеорологических условий. Так же в алгоритме заложен механизм проверки достоверности входных данных и полученных результатов.

Формула Э. М. Ольдекопа:

$$E = E_0 \operatorname{th}\left(\frac{P}{E}\right) \quad (5.2)$$

Формула В.С. Мезенцева и Л. Тюрка:

$$E = E_0 \left[1 + \left(\frac{P}{E_0} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (5.3)$$

Формула М.И. Будыко:

$$E = \sqrt{E_0 \operatorname{th}\left(\frac{P}{E_0}\right) P \left(1 - e^{-\frac{E_0}{P}}\right)} \quad (5.4)$$

Формула П. Шрайбера:

$$E = P(1 - \exp^{-\frac{E_0}{P}}) \quad (5.5)$$

Формула Л. Тюрка:

$$E_0 = 300 + 25 T^2 + 0,05 T^3 \quad (5.6)$$

Формула А.Н Постникова:

$$E_0 = (350 + 5,5 T) e^{0,07 T} \quad (5.7)$$

где E — испарение;
 E_0 — испаряемость;
 P — осадки, мм;
 T — норма температуры воздуха, °C

В результате анализа, рассчитанных значений для каждого метода, были выбраны следующие формулы: П. Шрайбера для испарения, Л. Тюрка для испаряемости.

Данные формулы рассчитывают испарение с меньшей погрешностью: $\delta m1$ (в среднем 15 %), δCv (в среднем 20%). Формула П. Шрайбера подходит для рек, протекающих в районах с континентальным климатом, как р. Омь и р. Ишим.

5.2.1 Расчет при постоянных параметрах модели

Самыми простыми моделями формирования стока являются модели со стационарными параметрами, так-как их расчет основывается на предположении о квазистационарности процесса. Например, модель (3.5), включает два параметра, определяемых интенсивностью случайных величин,

участвующих в климатических процессах, и характеристиками подстилающей поверхности водосборного бассейна. Процедура калибровки данной модели состоит в определении численных значений указанных параметров исходя из первых двух статистических моментов гидрологического ряда за один период (например, 1940–1989 гг.) согласно выражениям (5.1). Рассчитанные таким образом значения используются для анализа статистических характеристик последующего временного интервала.

Таблица 5.2.1 – Фактические и условно-прогнозные статистические характеристики, полученные для разных периодов водности при постоянных параметрах модели при расчете по формулам (5.1)

Река – пост	Фактические данные		Прогнозные		Относительная погрешность для h
	C_v	h	C_v	h	
Омь – с. Крещенка	1,10	50	1,31	60	16%
Омь – с. Чумаково	0,61	60	0,54	69	13 %
Омь – г. Куйбышев	0,78	36	0,60	40	10%
Омь – с. Вознесенское	0,61	29	0,58	26	12%
Омь – г. Калачинск	0,53	36	0,63	42	13%
Омь – г. Омск	0,6	43	0,76	49	12%
Ишим – г. Ишим	0,63	11	0,89	13	15%
Ишим – с. Викулово	0,20	13	0,25	15	13%
Ишим – с. Орехово	0,63	15	0,78	18	17%

Относительная погрешность прогноза находится в диапазоне от 10% до 17%. Анализ результатов моделирования (Таблица 5.2.1) показывает, что модель показывает приемлемую точность и ее можно использовать в дальнейшем. Наиболее точный прогноз получен на гидрологических постах с меньшим водосбором. Кроме того, два поста ГП р.Омь – г. Куйбышев и ГП р.Омь – г. Калачинск с большим длинным периодом наблюдения показали лучшие результаты.

5.2.2 Расчет при переменных параметрах модели

Для того чтобы учесть изменения в условиях формирования стока, обусловленных влиянием различных факторов – таких как изменение климата, площади водосбора, системы водоотведения, антропогенной нагрузки, необходимо применять модели с изменяемыми параметрами.

Данный метод повышает точность прогнозирования и учитывает влияние различных параметров на водный баланс. Для этого необходимо изменить модель (3.5).

Для этого вводятся переменные параметры, зависящие от внешних воздействий. Например, при влиянии климатических изменений, необходимо учесть испарение, которое зависит от испаряемости. Кроме того, интенсивность изменчивости «внешнего влияния» может быть связана с нормой или дисперсией годовых осадков, выпадающих в бассейне.

Модель (3.5) позволяет учесть изменчивость стока за счет введения переменных параметров (приземной температуры воздуха и суммы осадков) в эмпирические формулы для испарения и испаряемости, участвующие в расчете коэффициента стока [16].

Для оценки глобальных климатических изменений используются данные климатических моделей сценариев *SSP1-2.6*, *SSP2-4.5*, *SSP 3-2.7* и *SSP 5-8.5*. Параметризация происходит с учётом всех разницей моделей,

прошедших ретроспективный анализ. На основе рассчитанных характеристик стока и коэффициентов вариации были построены кривые обеспеченности, аппроксимируемые трехпараметрическим распределением Пирсона III типа. Применение данного типа распределения позволяет точно описать экстремальные значения, что важно при оценке влияния климатических изменений.

Кривая обеспеченности Пирсона III позволяет описать вероятность превышения определенного значения гидрологической величины. Кривая определяется тремя основными параметрами: математическое ожидание, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии (может быть как положительным, так и отрицательным). Кривая подходит для описания рядов, как с отрицательной, так и с положительной асимметрией. Она позволяет учесть экстремально низкие и высокие расходы воды.

Программа (Приложение Г) позволяет интерполировать нормированные ординаты(t_p) кривых обеспеченности по заданным значениям C_s . Для каждого значения t_p автоматически рассчитываются модульные коэффициенты (5.8). От k_p по заданным Q , рассчитанным при моделировании стока с использованием сценарных оценок температуры и осадков.

$$k_p = t_p \cdot C_v + 1 \quad (5.8)$$

где k_p – модульный коэффициент;
 t_p – нормированная ордината кривой обеспеченности;
 C_v – коэффициент вариации.

Кривые обеспеченности построены с помощью программы (Приложение Д). Она позволяет объединить кривые обеспеченности для всех моделей в рамках сценария на одном графике. Это позволяет наиболее наглядно представить полученные результаты и сравнить их между собой.

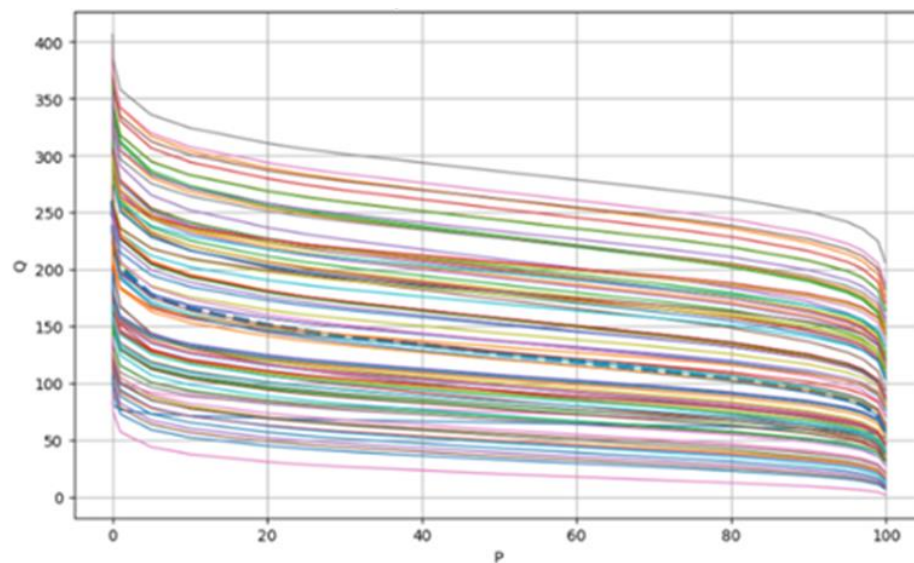


Рисунок 5.6 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Куйбышев: сценарий SSP1-2.6 (85 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

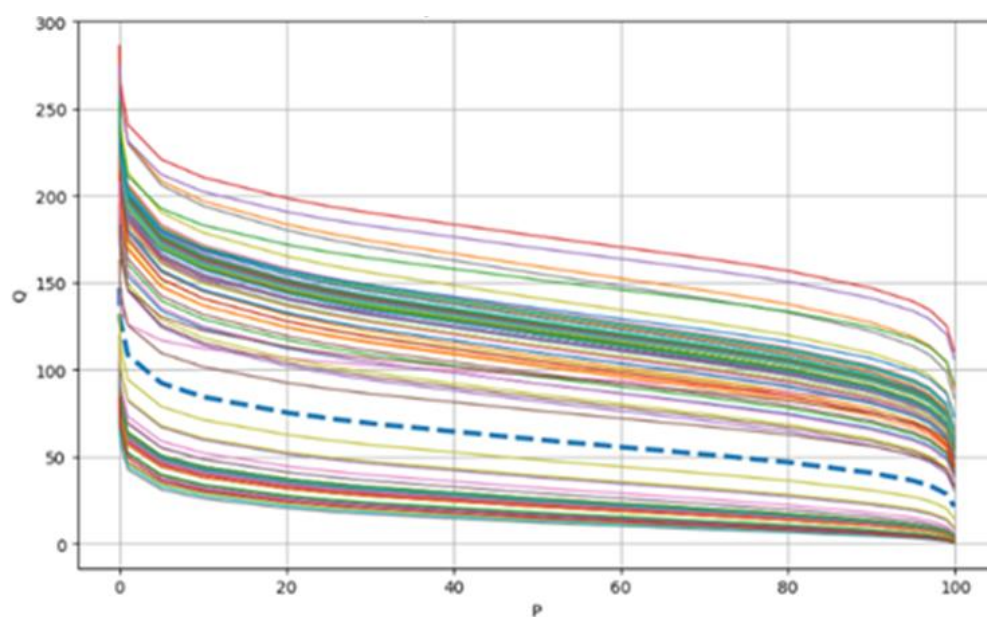


Рисунок 5.7 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Куйбышев: сценарий SSP2-4.5 (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

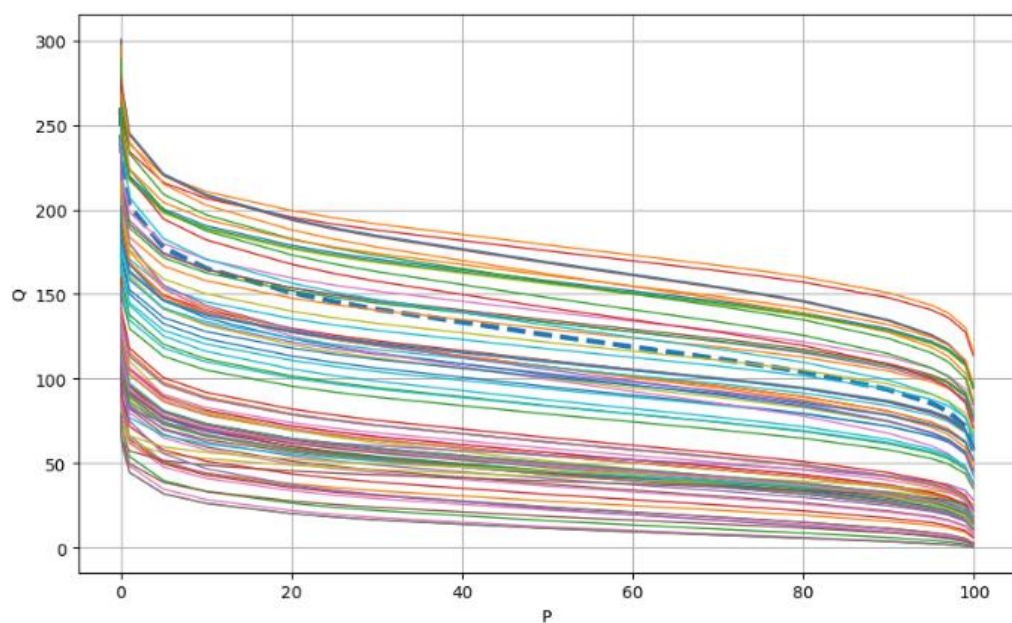


Рисунок 5.8 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Куйбышев: сценарий *SSP3-2.7* (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

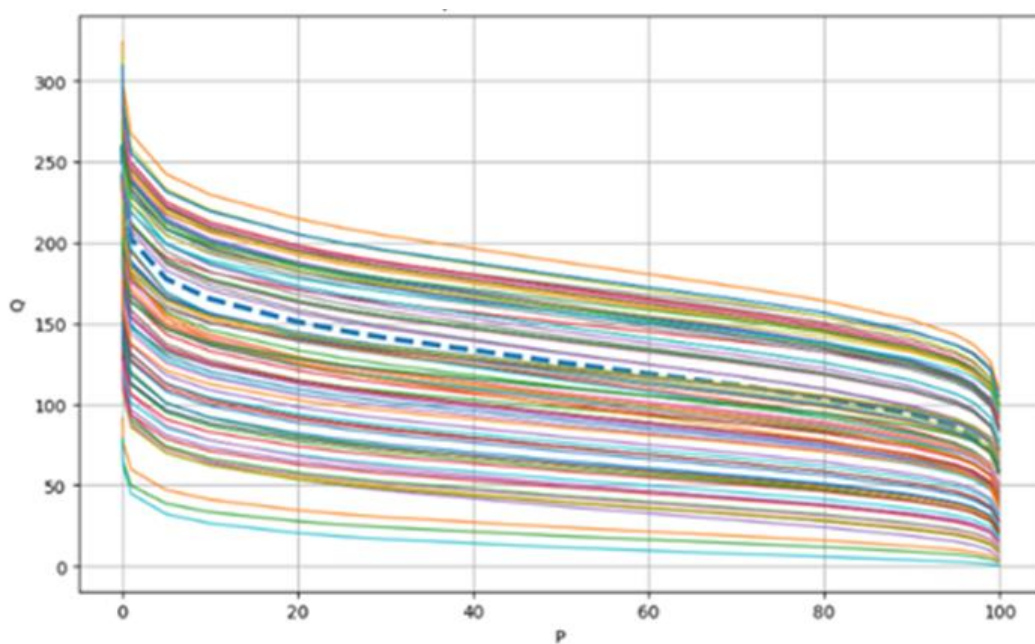


Рисунок 5.9 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Куйбышев: сценарий *SSP5-8.5* (90 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

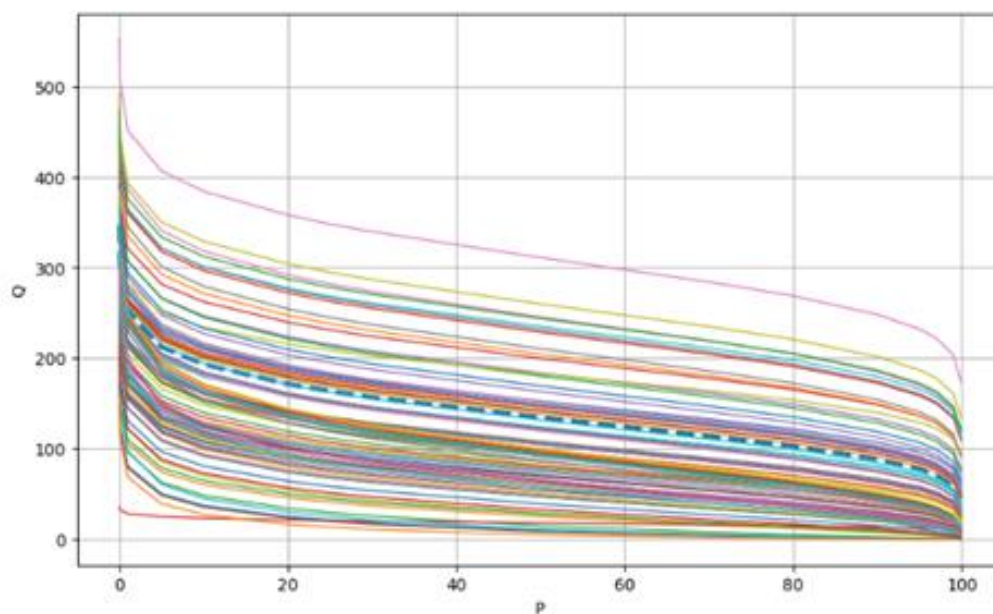


Рисунок 5.10 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Крещенка: сценарий *SSP1-2.6* (85 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

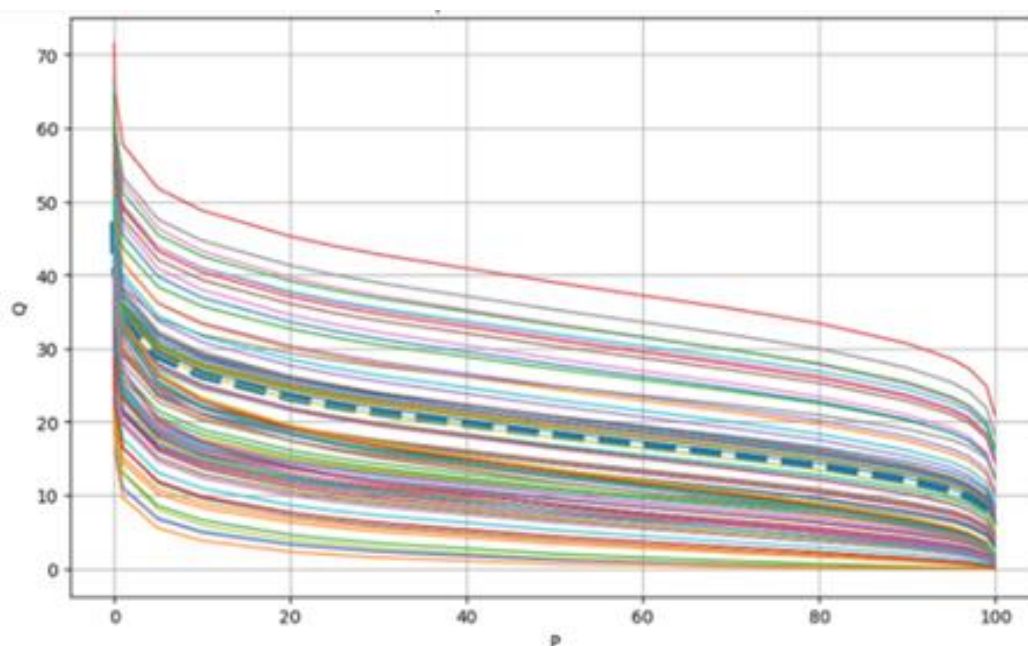


Рисунок 5.10 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Крещенка: сценарий *SSP2-4.5* (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

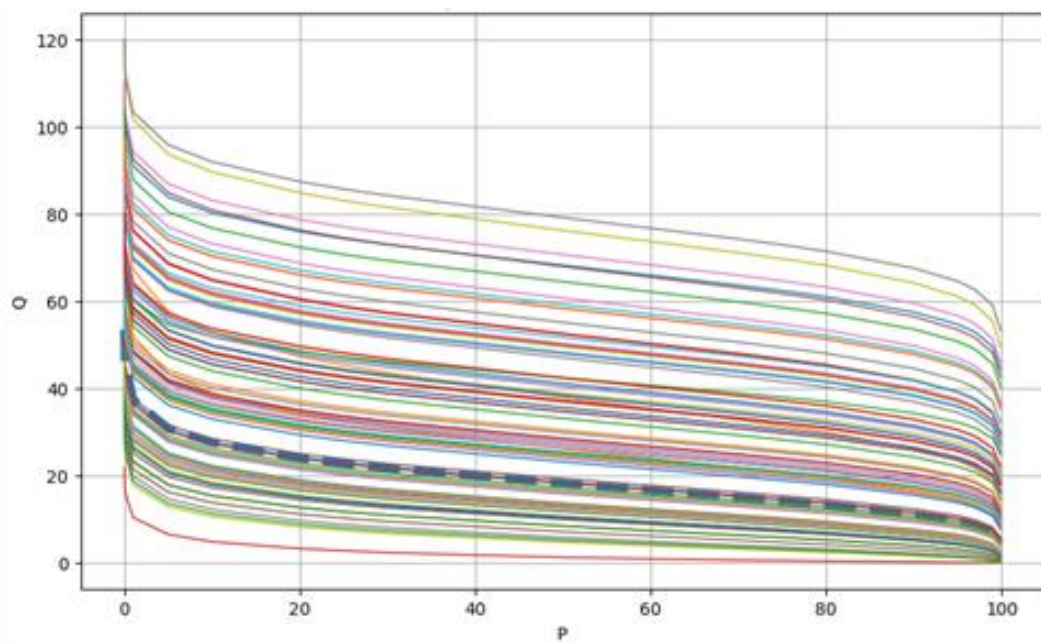


Рисунок 5.11 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Крещенка: сценарий SSP3-2.7 (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

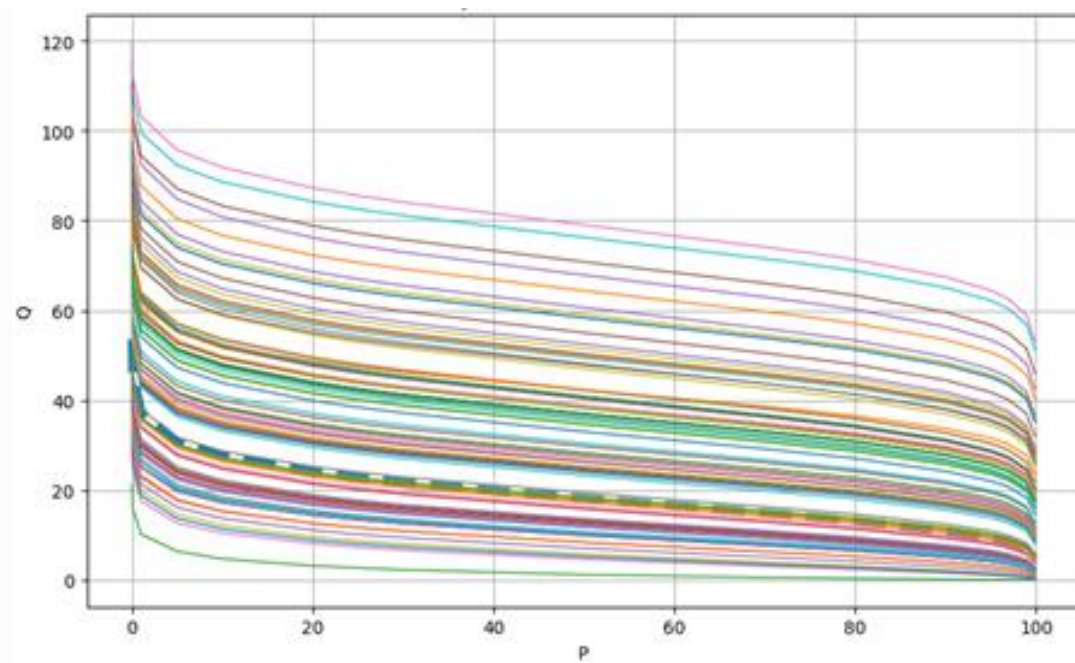


Рисунок 5.11 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Крещенка: сценарий SSP5-8.5 (90 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

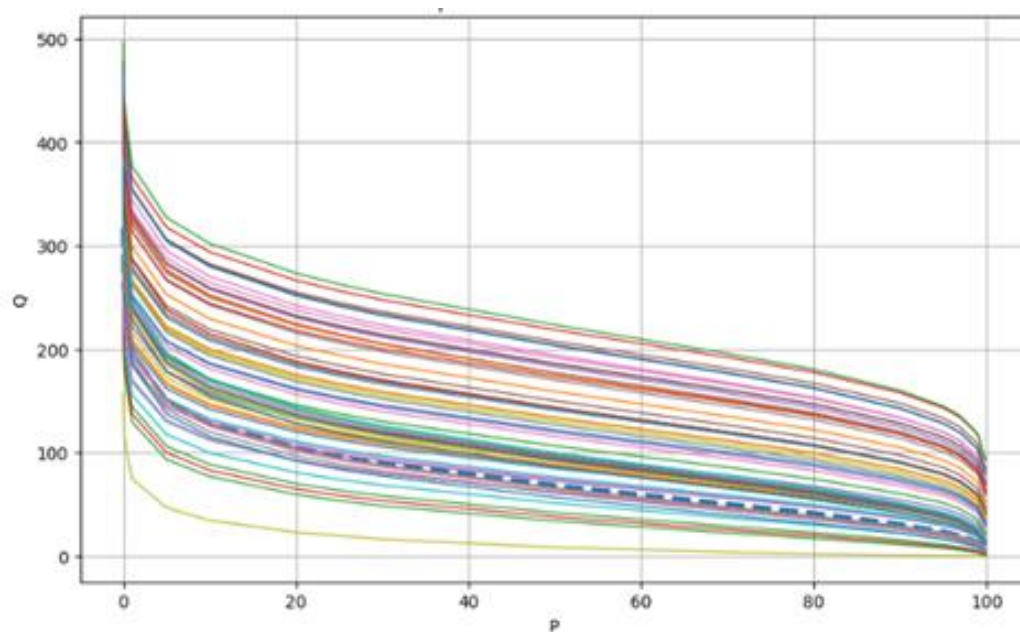


Рисунок 5.12 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Калачинск: сценарий *SSP1-2.6* (85 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

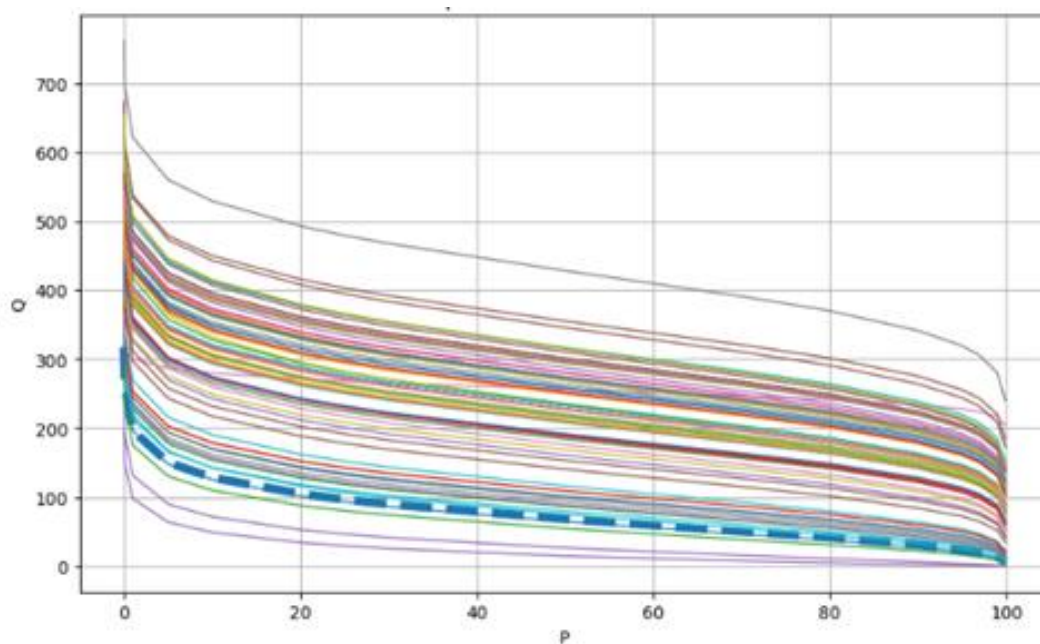


Рисунок 5.13 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Калачинск: сценарий *SSP2-4.5* (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

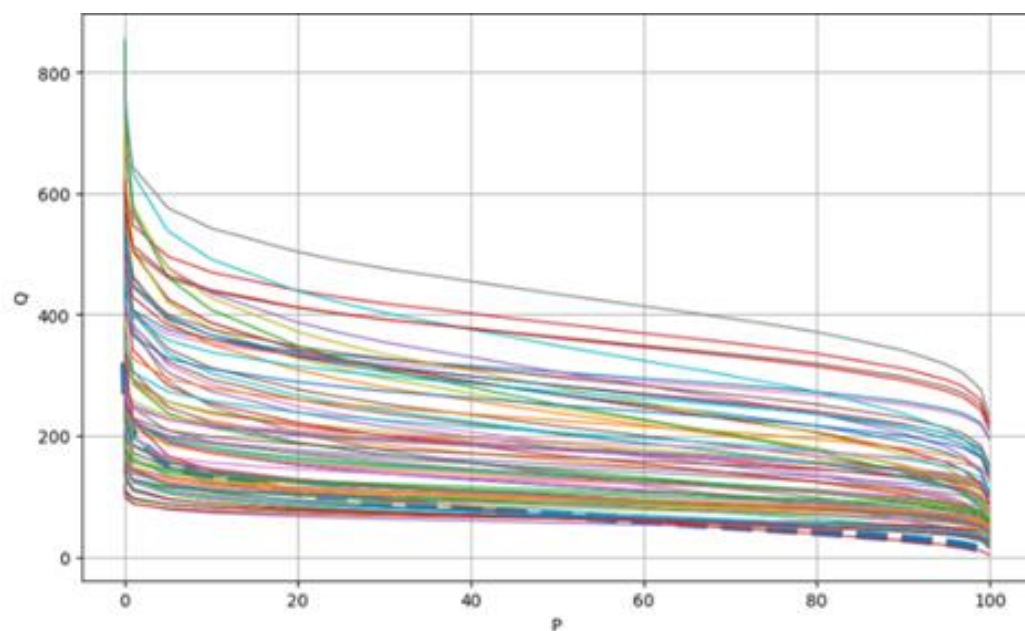


Рисунок 5.14 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Калачинск: сценарий *SSP3-2.7* (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

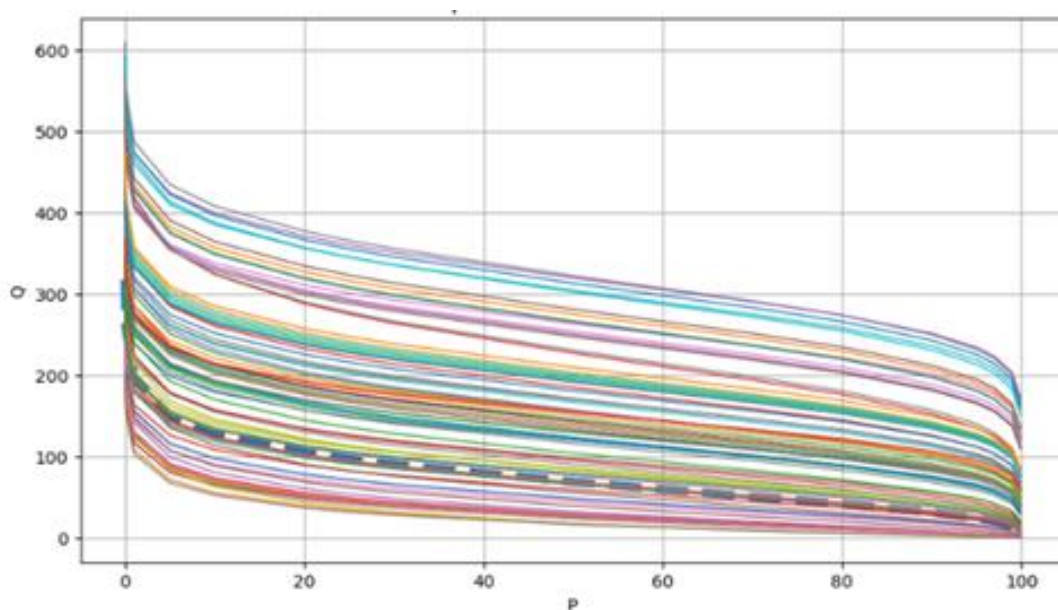


Рисунок 5.15 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Калачинск: сценарий *SSP5-8.5* (90 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

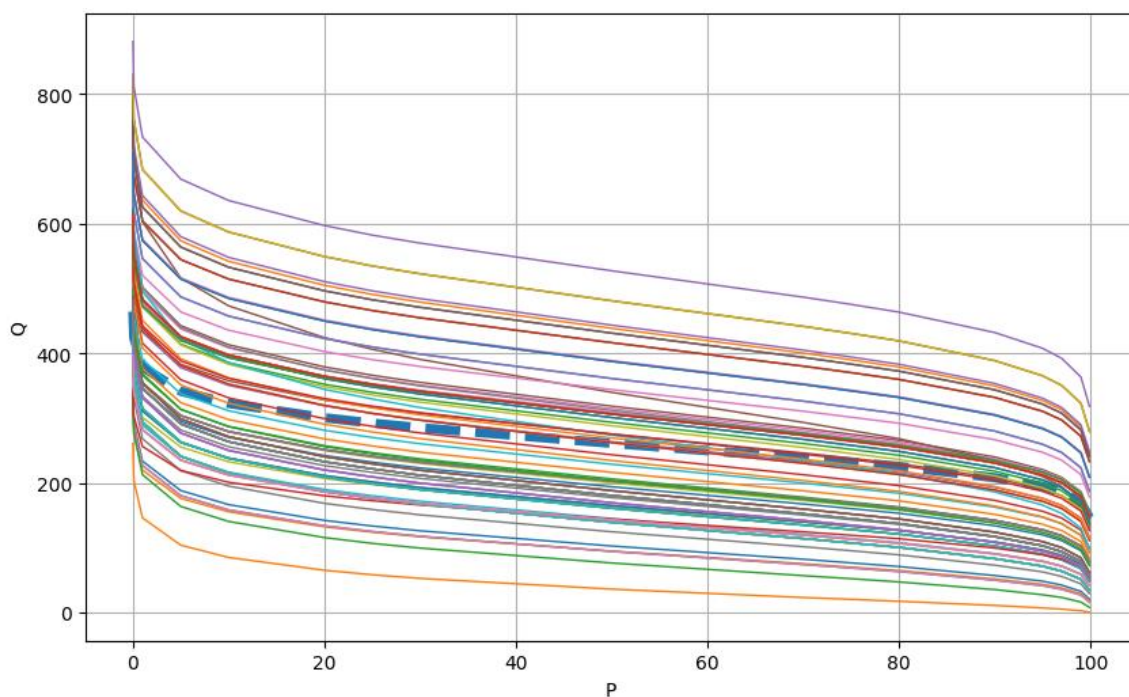


Рисунок 5.16 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Вознесенское: сценарий *SSP1-2.6* (85 реализаций)

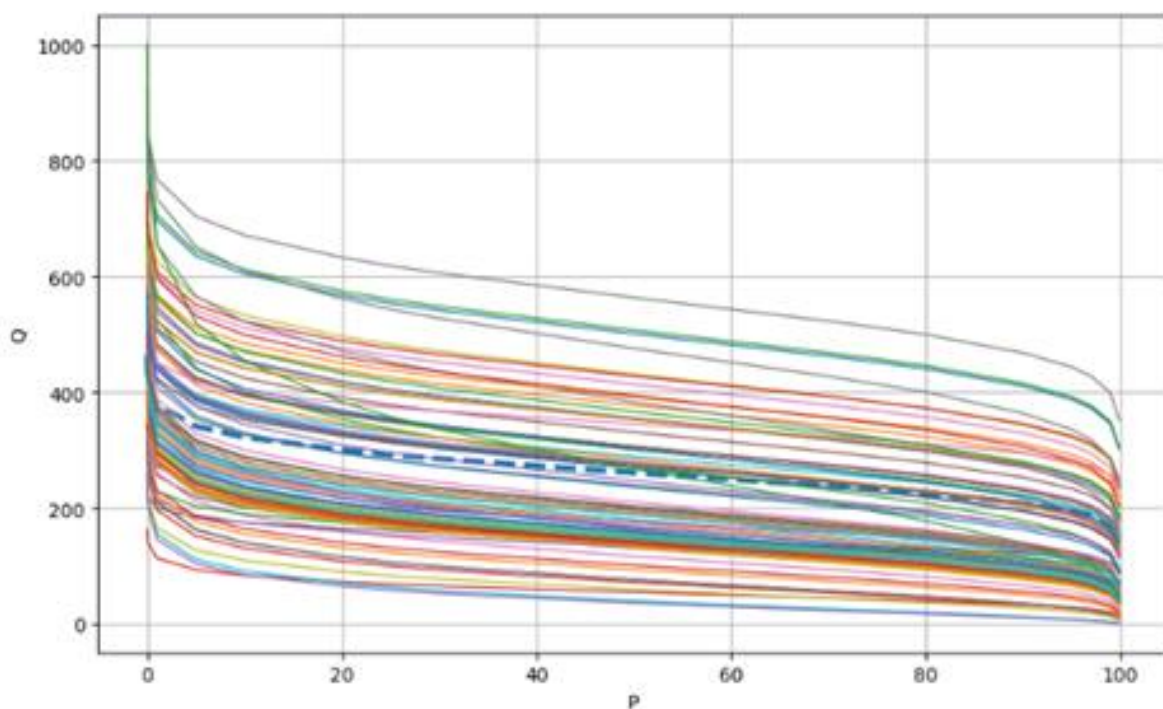


Рисунок 5.17 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Вознесенское: сценарий *SSP2-4.5* (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

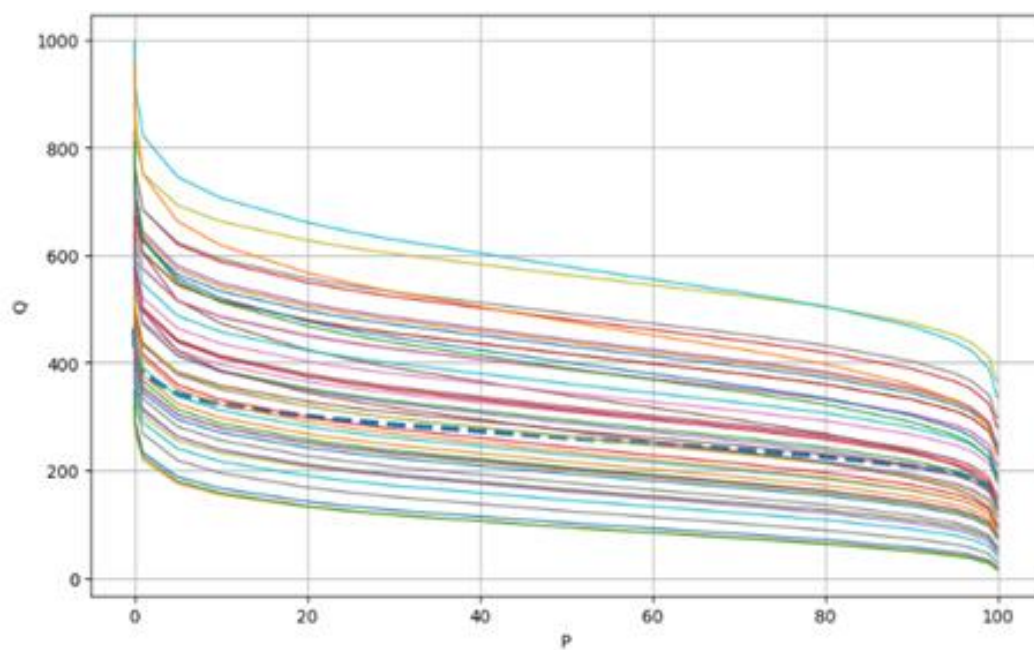


Рисунок 5.17 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Вознесенское: сценарий *SSP3-2.7* (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

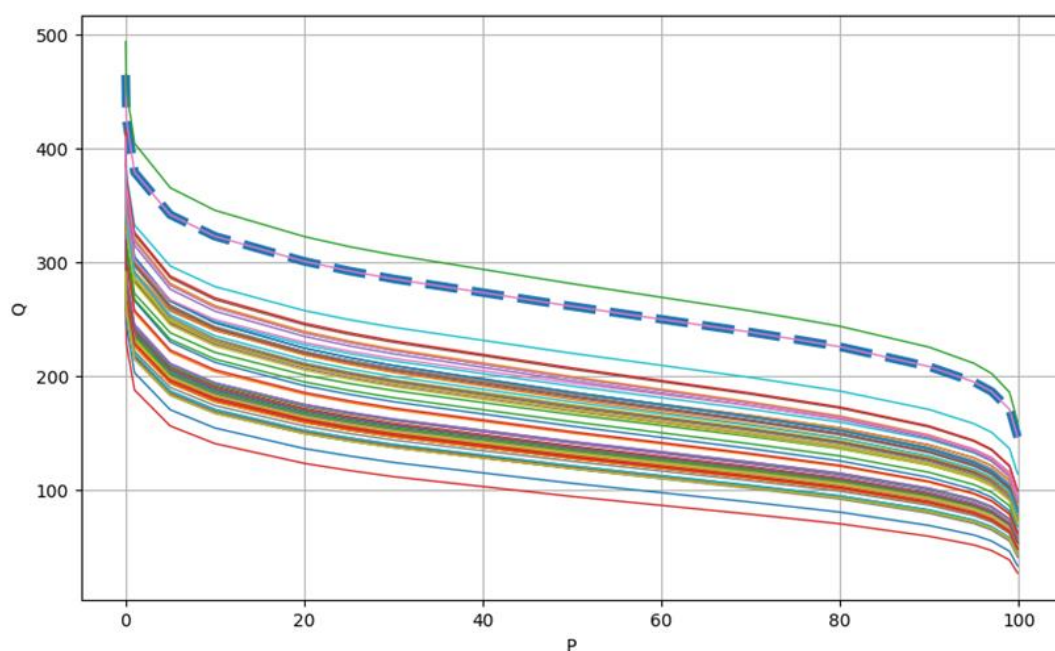


Рисунок 5.17 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Вознесенское: сценарий *SSP5-8.5* (90 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

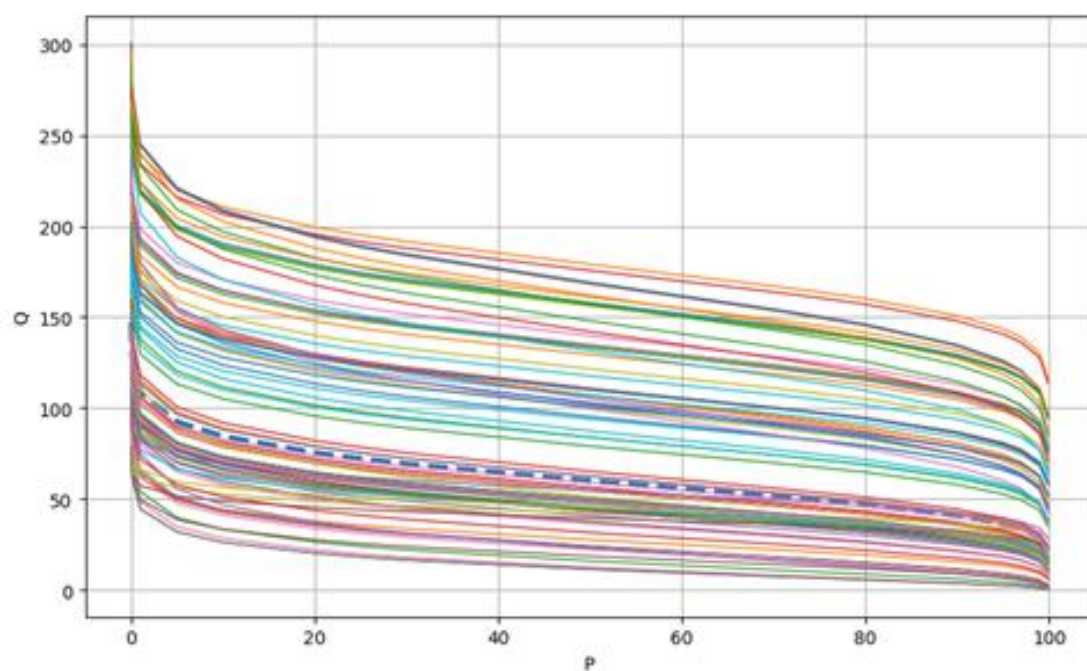


Рисунок 5.18 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Чумаково: сценарий *SSP1-2.6* (85 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

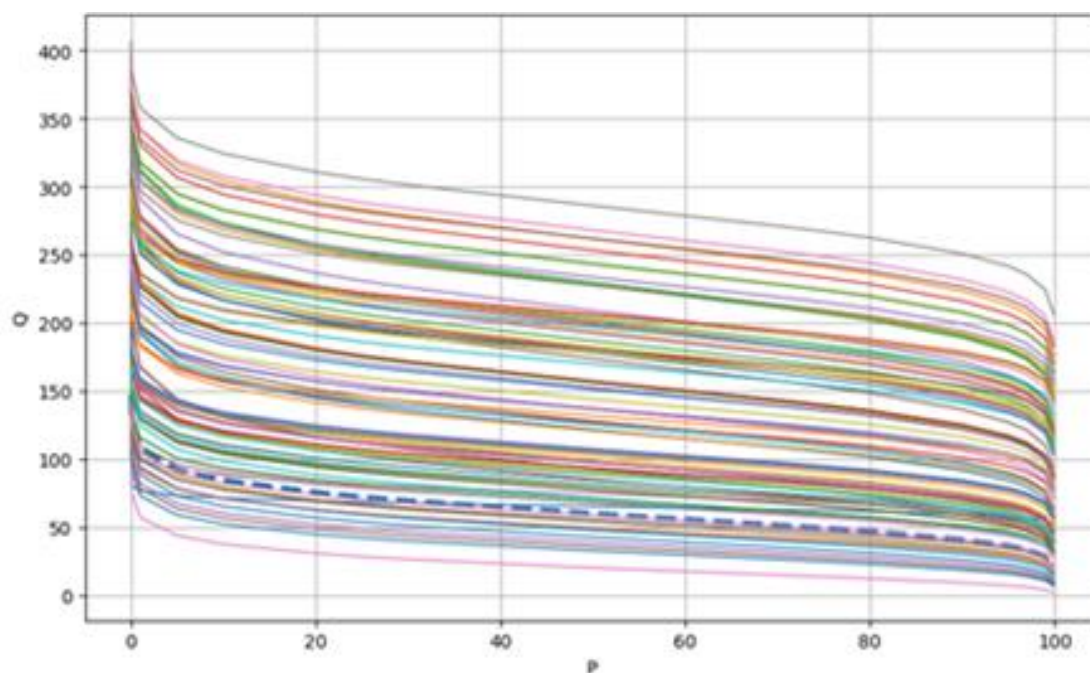


Рисунок 5.18 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Чумаково: сценарий *SSP2-4.5* (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

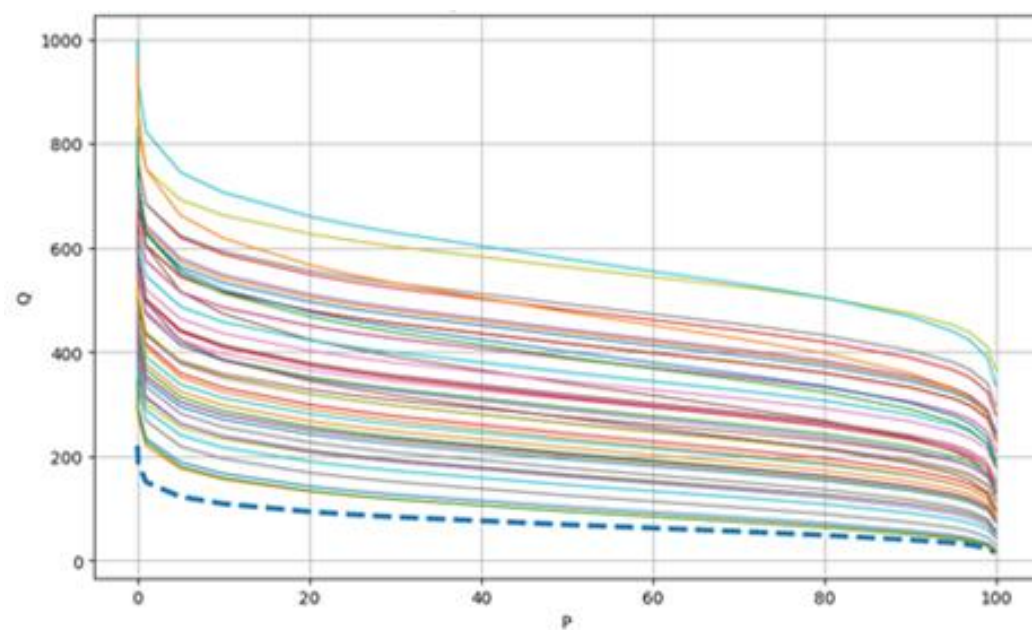


Рисунок 5.19 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Чумаково: сценарий SSP3-2.7 (80 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

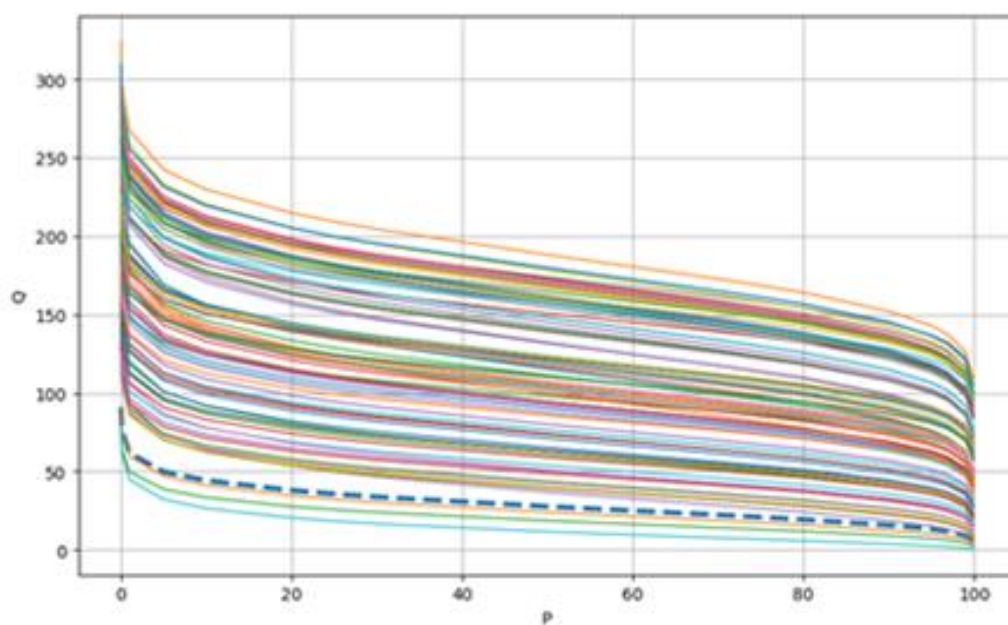


Рисунок 5.20 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Чумаково: сценарий SSP5-8.5 (90 реализаций). (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

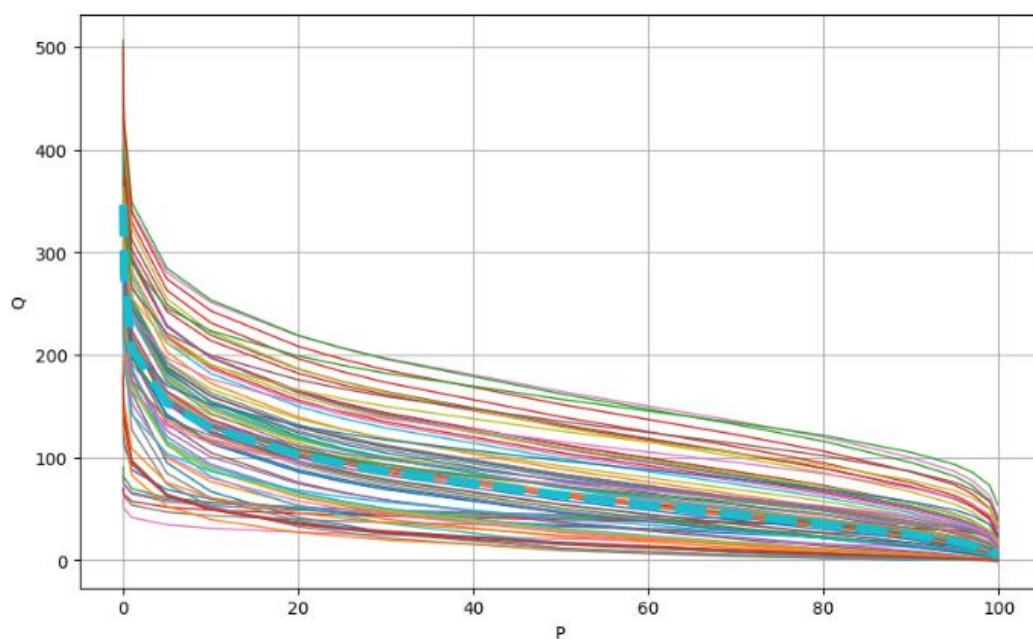


Рисунок 5.21 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Омск: сценарий SSP1-2.6 (85 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

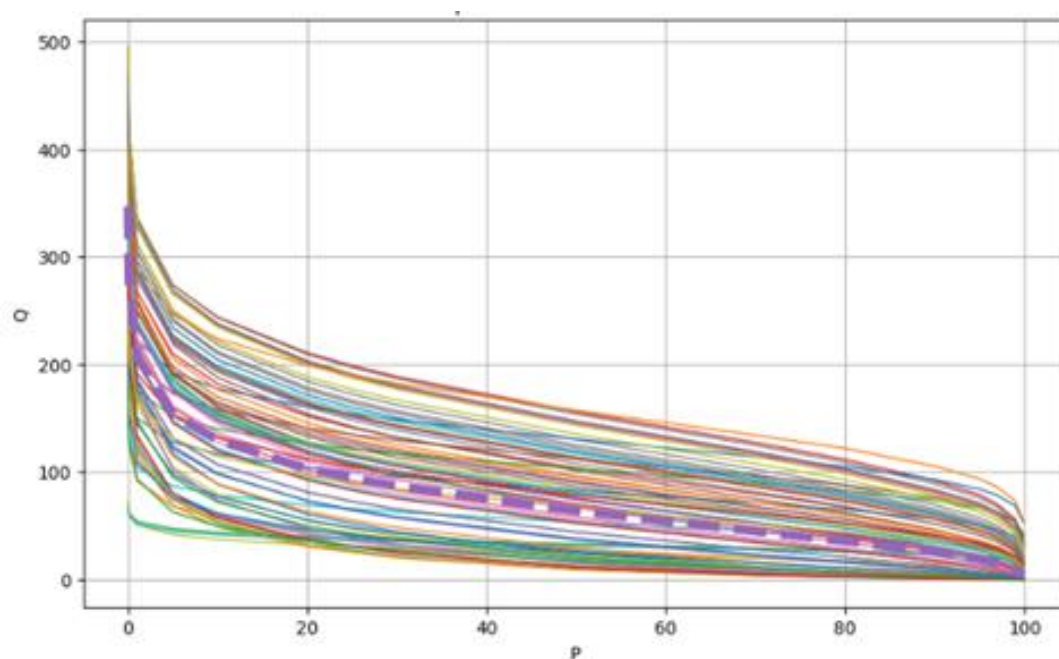


Рисунок 5.22 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Омск: сценарий SSP2-4.5 (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

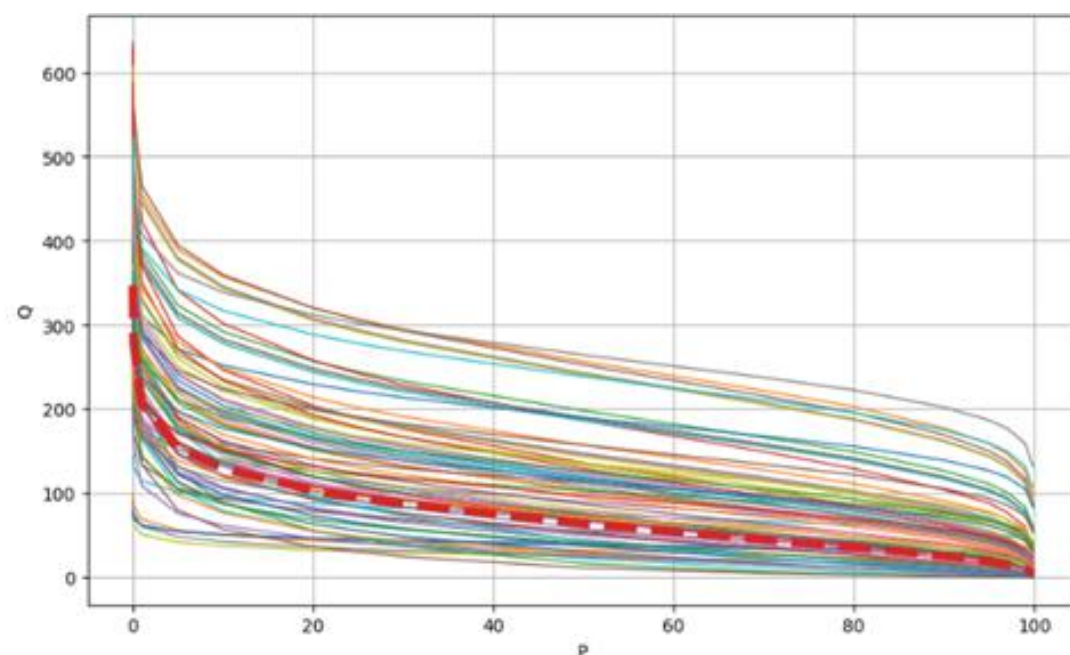


Рисунок 5.23 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Омск: сценарий SSP3-2.7 (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

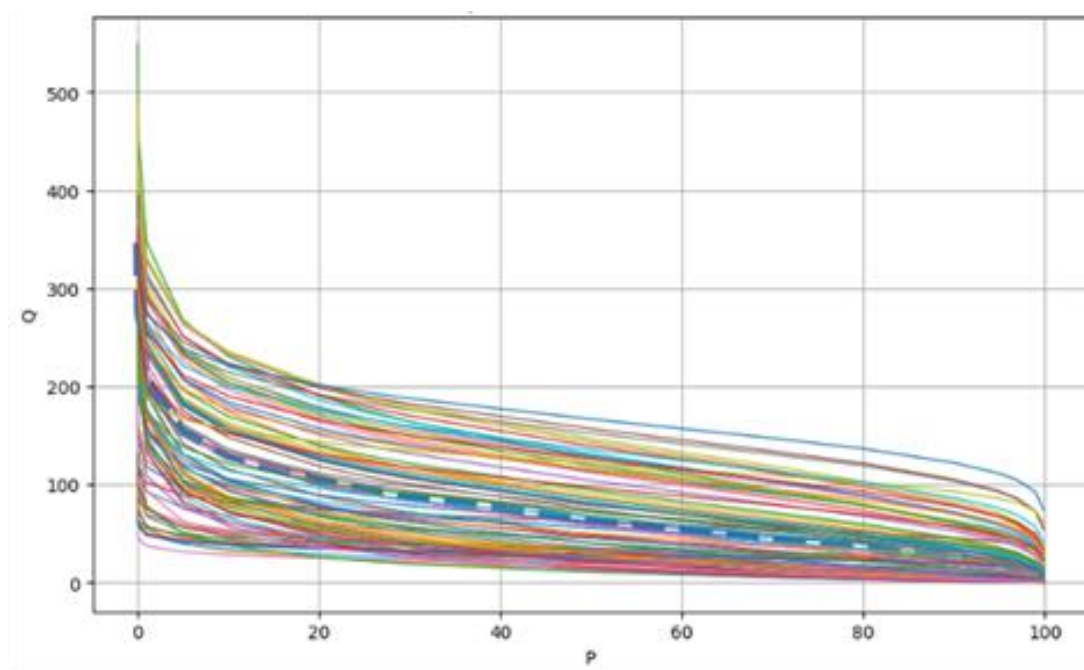


Рисунок 5.24 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – г.Омск: сценарий SSP5-8.5 (90 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

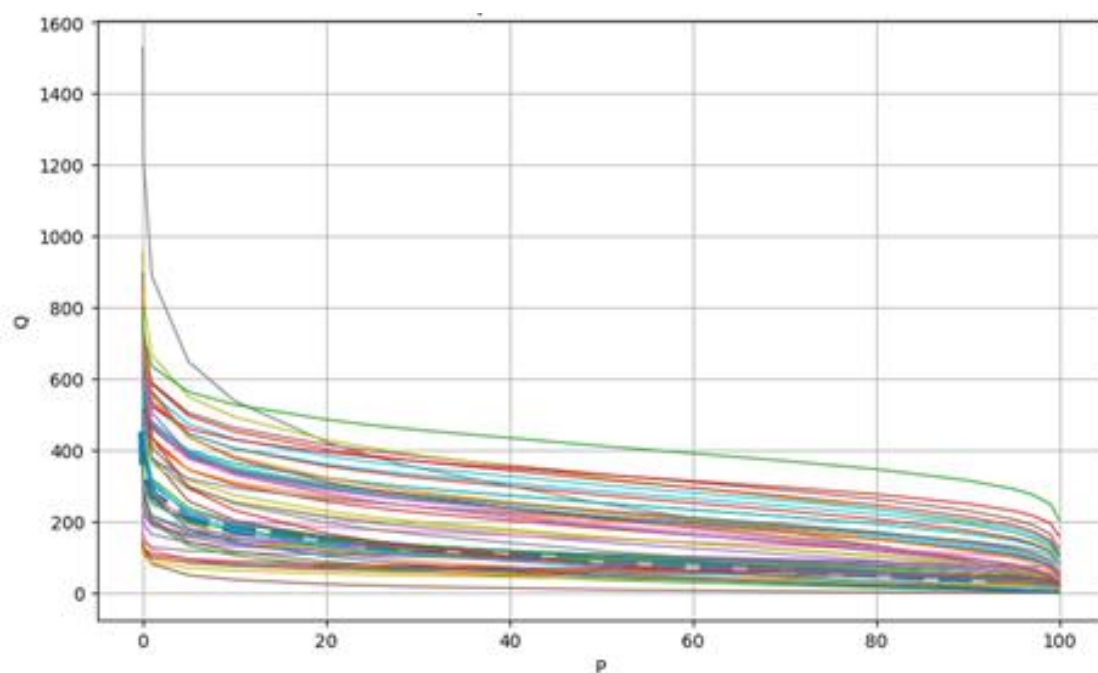


Рисунок 5.25 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Викулово: сценарий SSP1-2.6 (85 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

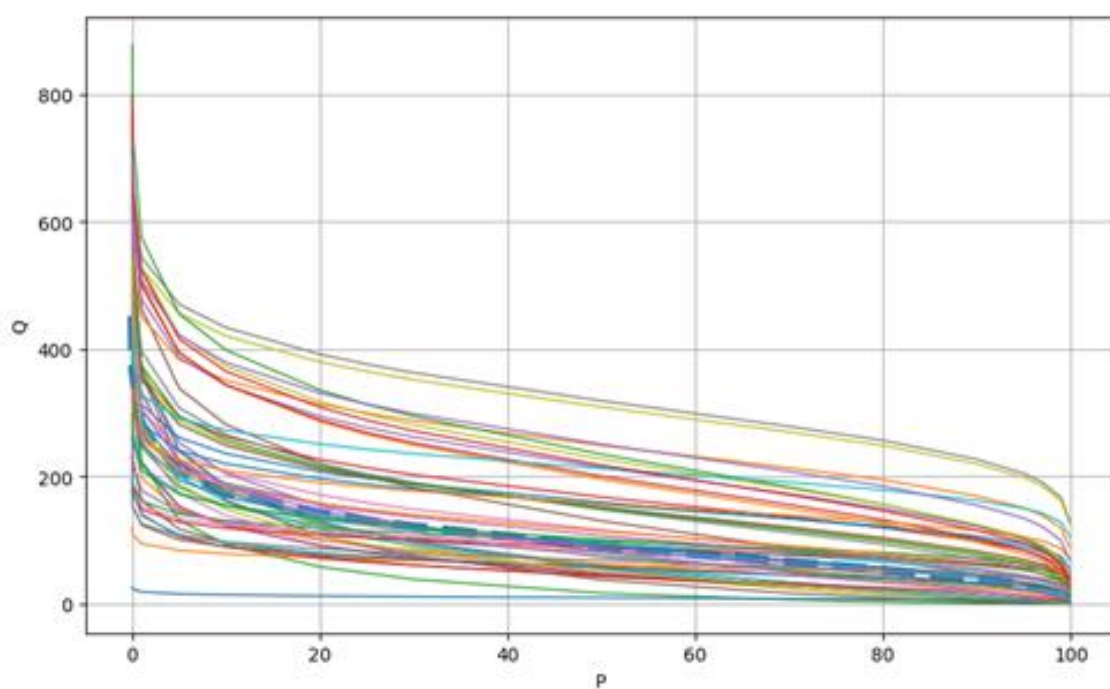


Рисунок 5.26 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Викулово: сценарий SSP2-4.5 (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

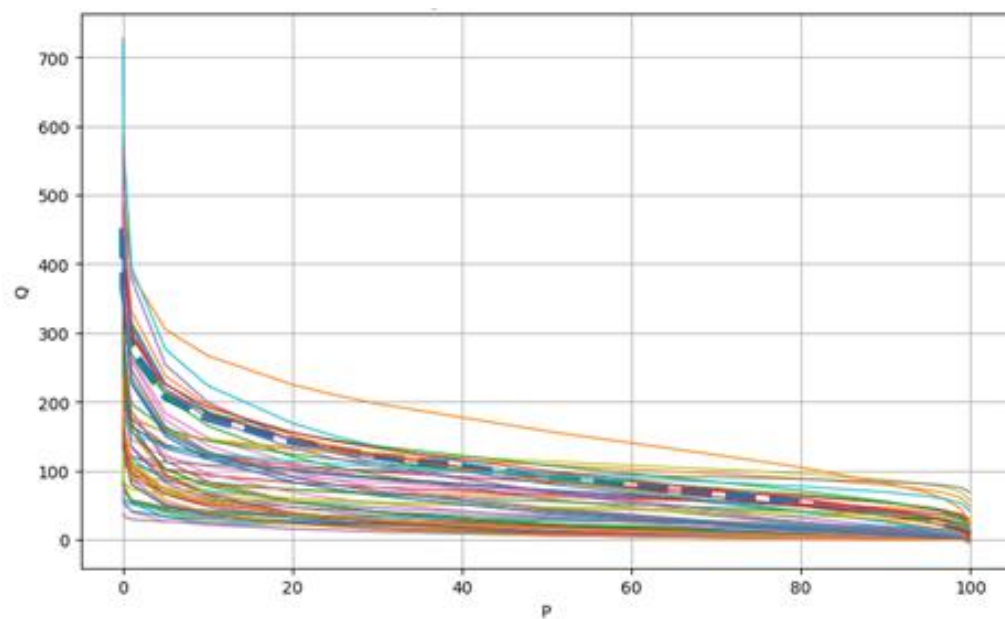


Рисунок 5.27 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Викулово: сценарий *SSP3-2.7* (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

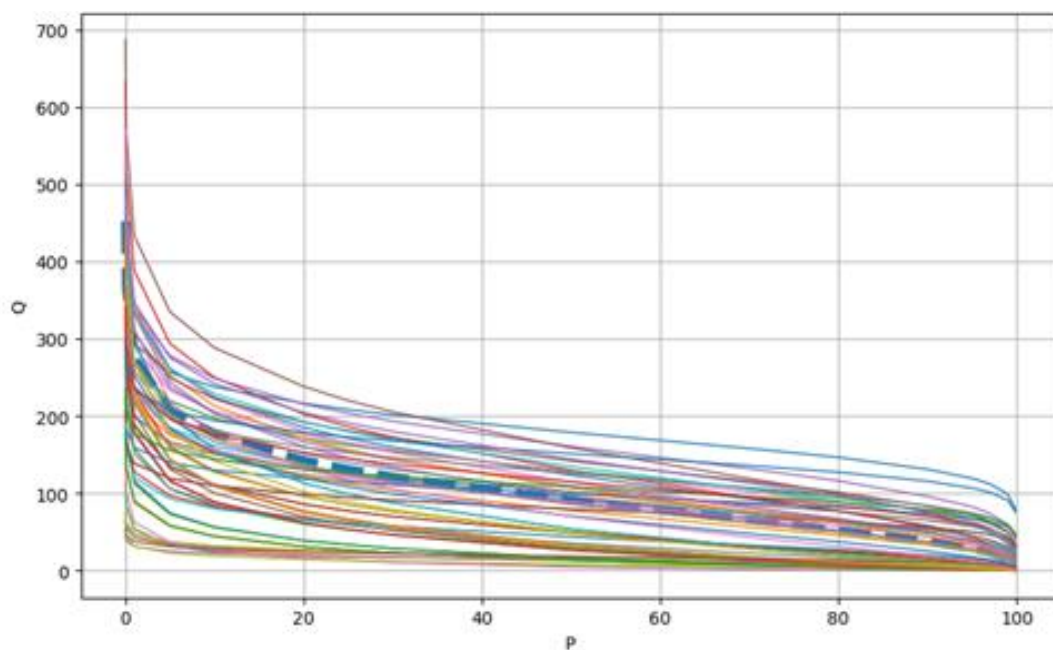


Рисунок 5.28 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Викулово: сценарий *SSP5-8.5* (90 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

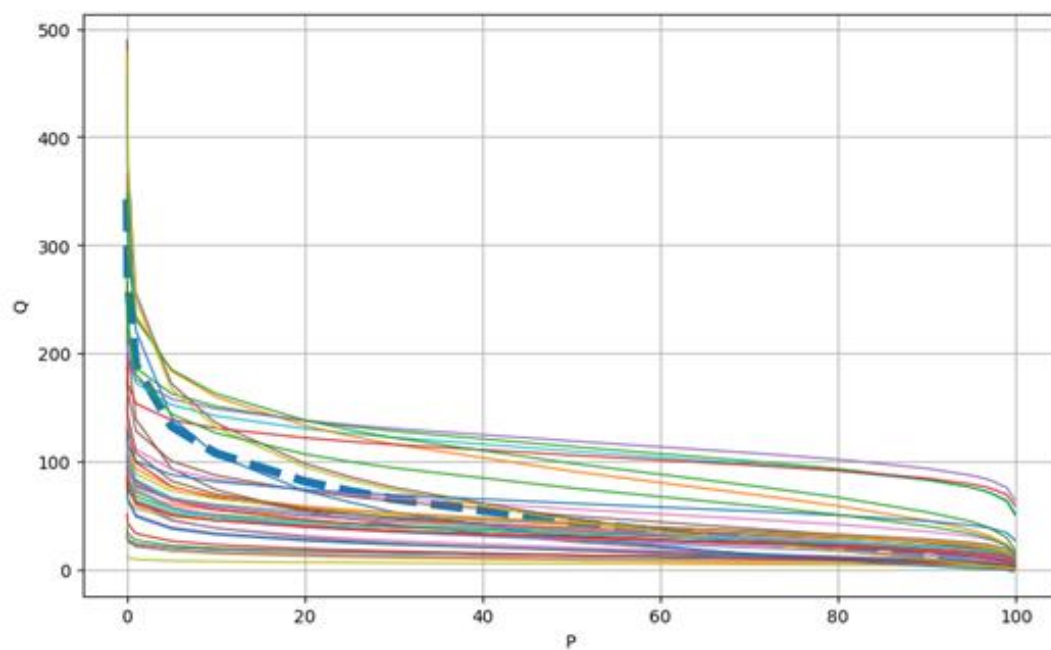


Рисунок 5.29 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – г.Ишим: сценарий *SSP1-2.6* (85 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

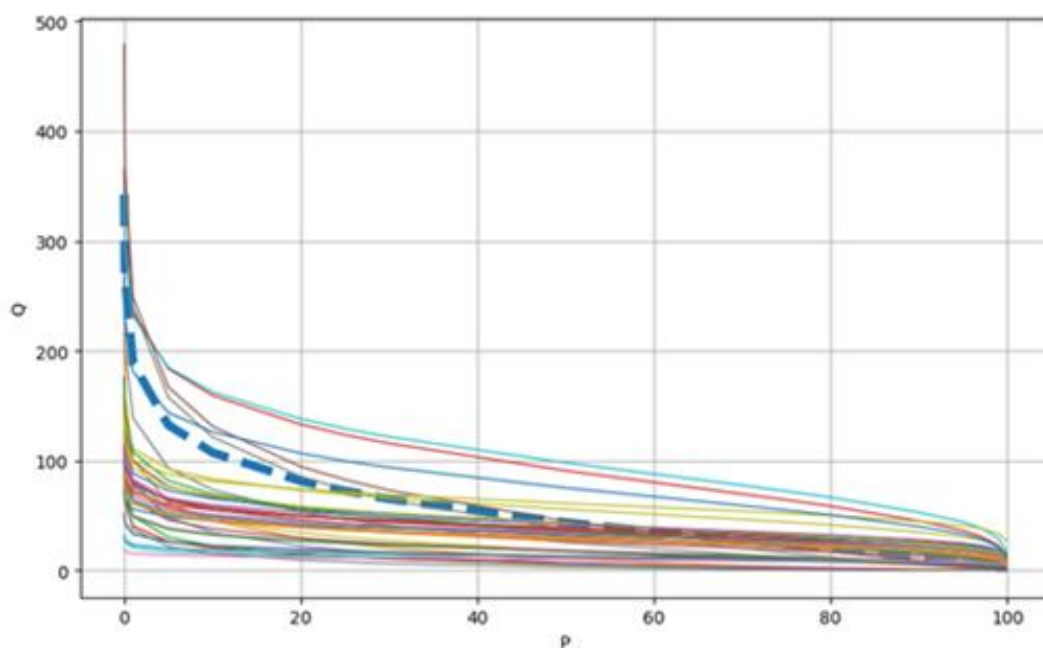


Рисунок 5.30 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – г.Ишим: сценарий *SSP2-4.5* (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

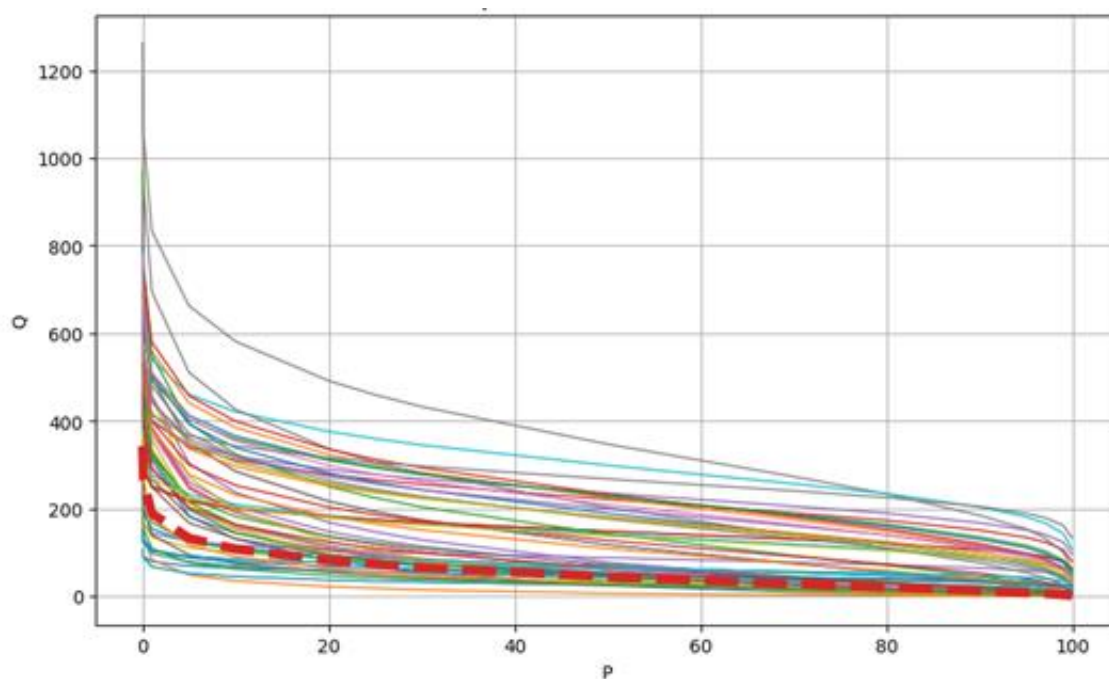


Рисунок 5.31 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – г.Ишим: сценарий SSP3-2.7 (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

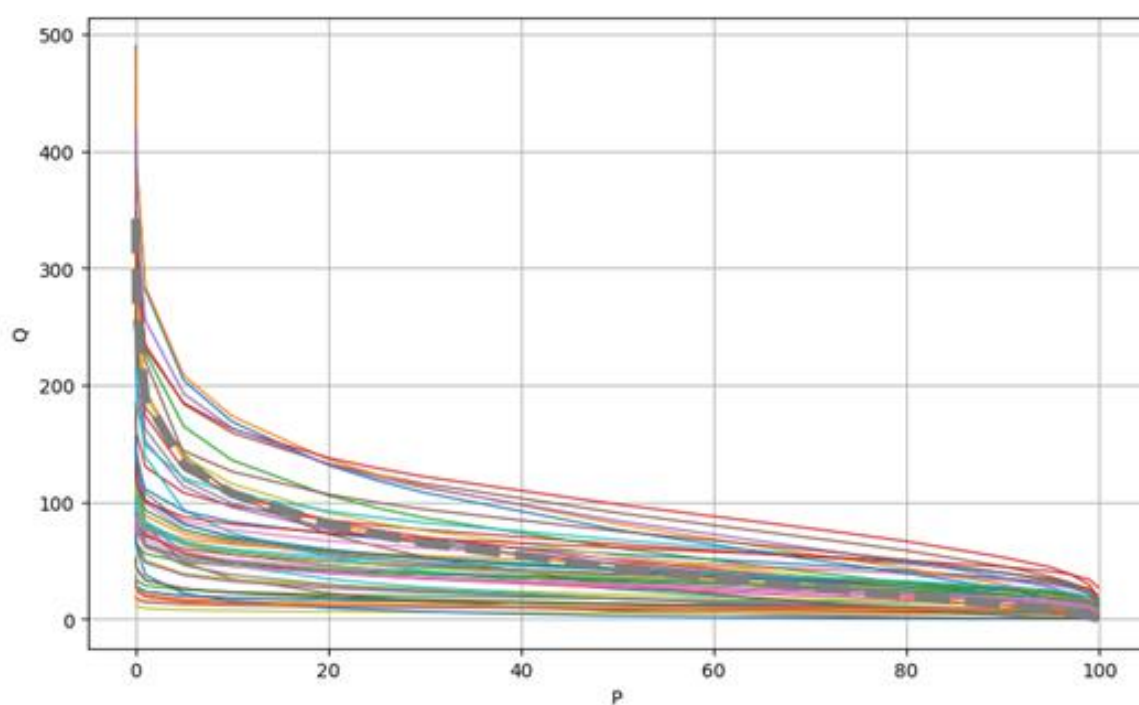


Рисунок 5.32 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – г.Ишим: сценарий SSP5-8.5 (90 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

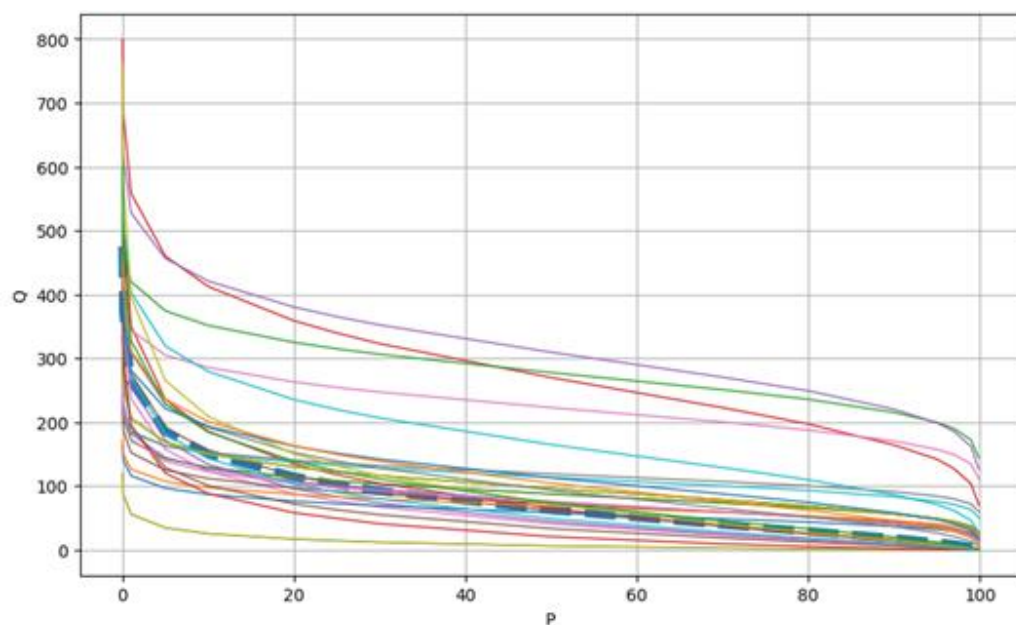


Рисунок 5.33 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Орлово: сценарий SSP1-2.6 (85 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

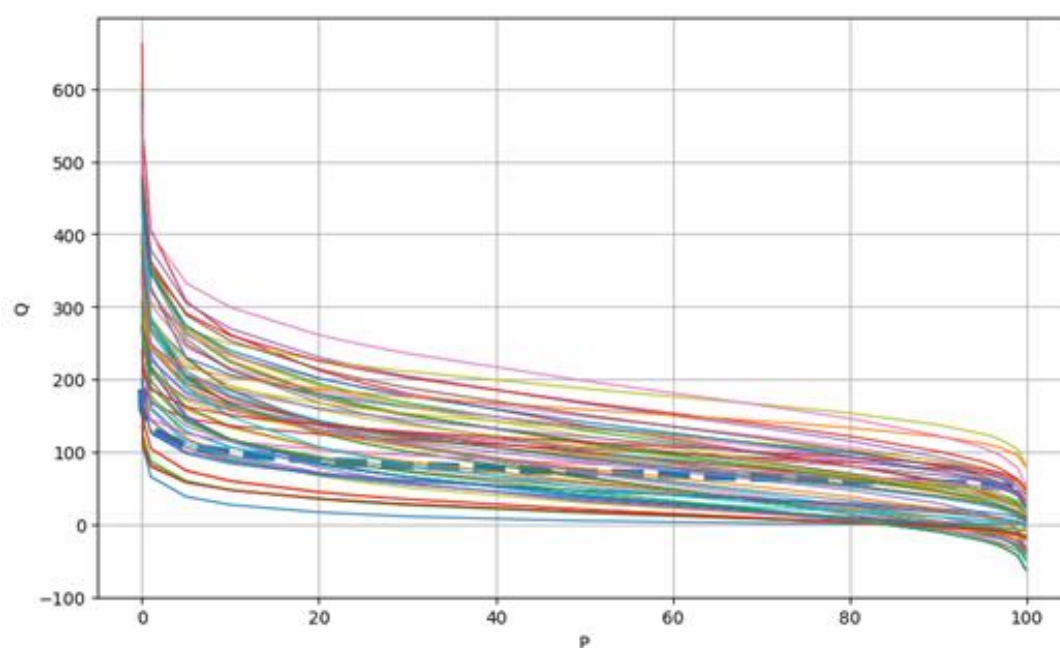


Рисунок 5.34 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Орлово: сценарий SSP2-4.5 (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

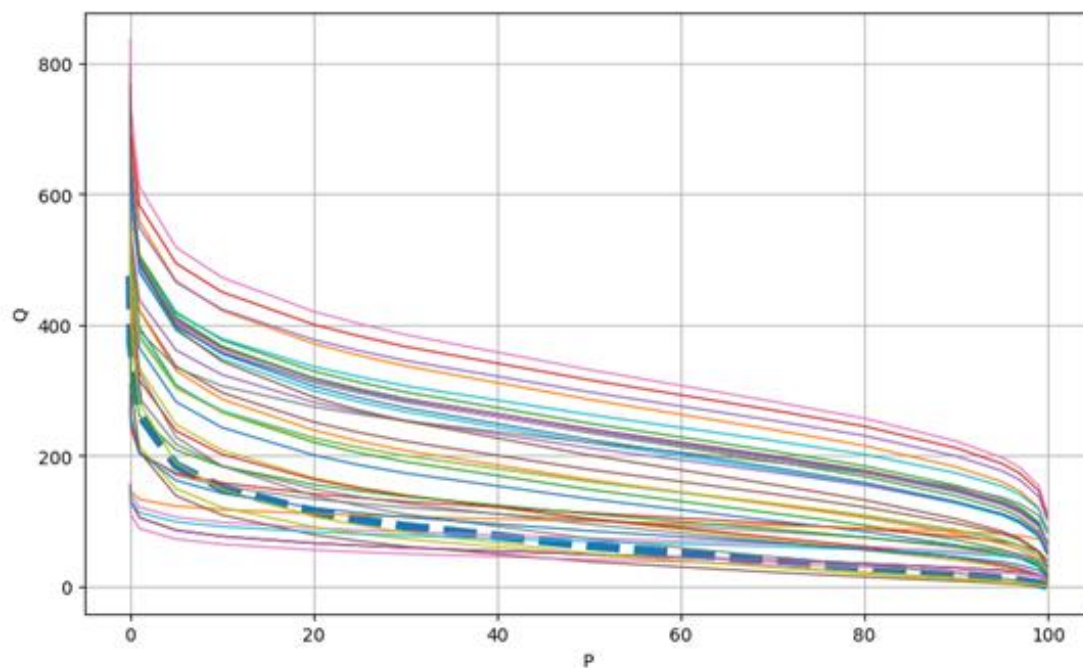


Рисунок 5.35 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Орлово: сценарий SSP3-2.7 (80 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

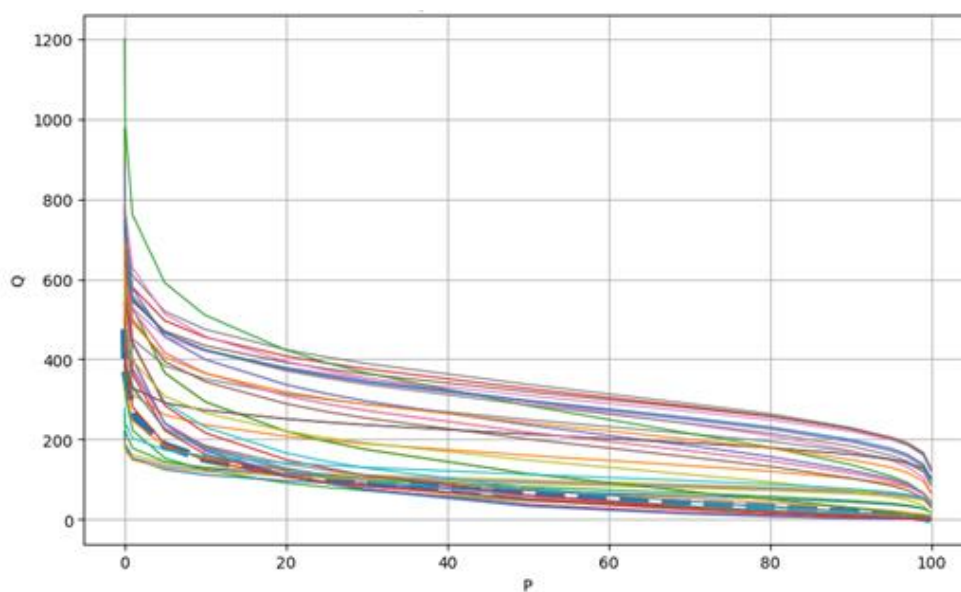


Рисунок 5.36 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Ишим – с.Орлово: сценарий SSP5-8.5 (90 реализаций); (Пунктирной линией показана фактическая кривая обеспеченности.)

5.3 Вывод

В результате анализа данных моделирования стока на реках Омь и Ишим, можно сделать вывод о влиянии изменения климата на их режим. После 1990-х годов наблюдается выраженный тренд на понижение стока, вероятно это обусловлено изменением среднегодовых значений приземной температуры и сумм осадков.

Моделирование с переменными параметрами, учитывающими климатические характеристики из сценариев *SSP*, позволило оценить степень влияния глобальных климатических изменений на сток рек. Большая часть расчетов указывает на уменьшение расходов воды на всех рассматриваемых постах. Хотя некоторые модели демонстрируют незначительное увеличение экстремальных значений расхода, но они составляют меньшую долю.

Кривые обеспеченности Пирсона III для реки Ишим демонстрируют изменчивость стока. Сценарий *SSP2-4.5* демонстрирует значительное увеличение стока, что может быть связано со стремительным увеличением осадков и медленным изменением приземной температуры воздуха. При этом кривые стока, полученные по сценариям *SSP3-2.7* и *SSP5.85*, демонстрируют экстремальное понижение стока. 80 % обеспеченный расход может принимать отрицательные значения. Вероятно, такие результаты указывают на увеличение испарения с водной поверхности к 2050 году.

На реке Омь все сценарии указывают на снижение расходов воды, что совпадает с фактическими данными. На всех кривых виден резкий спад после 60% обеспеченности, это говорит о больших колебаниях стока. Самые минимальный расходы прогнозируют модели из сценариев *SSP3-2.7* и *SSP5-8.5*. Меньшего всего режим рек будет изменяться при реализации устойчивого сценария *SSP1-2.6*.

Можно сделать общий вывод, что на реках Западной Сибири будут наблюдаться изменения режима уже к 2050 году. Необходимо оценить влияние изменений на экономику региона, особенно на водозависимые

отрасли. Так-как на данный момент тяжело спрогнозировать реализацию того или иного пути, требуется вероятностная оценка для охвата всего спектра возможных исходов.

6 Вероятностная оценка экономической эффективности расчетов статистических характеристик многолетнего стока в сельском хозяйстве

6.1 Формулировка задачи

Глобальные климатические изменения уже сейчас оказывают значительное воздействие на сток рек. Как следствие, страдают водозависимые производства. Повышение приземной температуры воздуха и осадков значительно влияет на водность рек, в связи с этим изменяются статистические характеристики многолетнего стока, такие как средний расход, минимальный и максимальный расходы, длительность периодов затопления и засухи и другие.

Одним из самых распространенных водозависимых производств является сельское хозяйство. Некоторые климатические сценарии могут привести к существенному снижению воды, используемой для орошения полей.

Для оптимизации производств в экономике используют расчет производственных функций. Для оценки влияния водных ресурсов на производства, функция рассчитывается с учетом водозабора.

Производственные функции в аграрной промышленности помогают определить оптимальное количество воды, необходимое для максимальной урожайности в конкретных климатических условиях. Входными параметрами в функции могут быть: количество воды, характеристики почвы, удобрения, технологии обработки почвы, характеристики оросительных систем региона. Таким образом, производственная функция является экономическим инструментом, помогающим улучшить качество и количество выращиваемых сельскохозяйственных культур [6].

Из-за изменения режима рек под влиянием климата, многие оросительные системы требуют замены на более работоспособные, так-как

при значительных потерях воды, доступных объемов не будет хватать для орошения полей.

Существует множество сценарных вариантов климатических, а в следствии и гидрологических изменений, невозможно точно предсказать, какой из них сбудется. Для решения данной проблемы, необходимо провести вероятностный анализ, который позволит определить процент каждой реализации от общего числа моделей.

6.2 Планирование социально-экономического развития субъекта РФ (на примере Западной Сибири)

Развитие аграрного промышленного комплекса на территории Западной Сибири является одной из главных задач в управлении экономикой региона.

Согласно распоряжению Правительства РФ от 26 января 2023 г. № 129-р, на территории Западной Сибири в плане долгосрочного социально-экономического развития до 2035 г., упор делается на сельскохозяйственный сектор [11]. Также в нем определены основные задачи и направления развития сельского хозяйства: повышение эффективности использования земельных ресурсов, развитие инфраструктуры, поддержка малого и среднего бизнеса в сфере сельского хозяйства, улучшение качества продукции и ее конкурентоспособности на рынке.

Для достижения, поставленных целей, в регионах на территории Западной Сибири реализуются различные программы, открываются новые аграрные предприятия, увеличивается площадь посевных полей. А также часть средств из бюджета региона направлена на модернизацию оросительных систем.

В регионе активно развивается сектор животноводства, для развития которого проводятся мероприятия по повышению качества кормов, созданию современных комплексов для содержания животных. Для этих нужд

расширяют площадь посева культур, к 2035 году планируется увеличение до 5000 га.

Стратегическое планирование является важным инструментом для определения основных направлений развития региона. На примере Западной Сибири можно рассмотреть основные этапы планирования:

- Определение приоритетов и целей развития региона на долгосрочную перспективу (10 лет). В стратегии должны быть определены опорные отрасли экономики, а также их меры поддержки. В Западной Сибири упор делается на промышленную обработку и добычу полезных ископаемых, гидроэнергетику и аграрную промышленность.
- Разработка четкого плана развития региона для каждой отрасли на 3-5 лет. В плане прописываются конкретные мероприятия и мероприятия. Например, на территории Западной Сибири существует проект по улучшению оросительных систем.
- На третьем этапе проходит реализация плана, контроль за выполнением поставленных задач. В конце происходит подведение итогов и составление дальнейших планов.

Оценка эффективности реализации плана является одним из важных этапов, именно это позволяет оценить результаты и разработать новую стратегию на будущее. В Сибирском федеральном округе разработана стратегия социально-экономического развития до 2035 года. В нем отражается степень доступности природных ресурсов для человека, с учетом влияния климата. В рамках стратегии намечены приоритетные направления, такие как аграрная промышленность, животноводство, добыча и переработка полезных ископаемых [11].

Сейчас наблюдается тренд на снижение стока рек, из-за изменения климата. Это влияет на доступность ресурсов для производств. Одним из самых распространенных водозависимых производств в Западной Сибири является сельское хозяйство.

Самые распространение виды сельскохозяйственной промышленности в Западной Сибири: выращивание зерновых культур, таких как пшеница, кормовые сорта, рапс; животноводство, молочное и мясное скотоводство.

На территории Омской и Новосибирской областей активно развивается промышленное возведение яровой пшеницы. Данный вид культур высаживают весной, а за лето она проходит все вегетационные циклы. Яровой пшенице требуется много влаги, а следовательно, и обильный полив. В климатических условиях, которые господствуют на территории юга Сибири, урожайность пшеницы может достигать 20–25 ц/га. В Омской и Новосибирской областях расположено большое количество крупных предприятий, которые занимаются промышленным выращиванием пшеницы, например ООО «Агро-Альянс» и «Сибирская Нива». Площадь засевов в среднем составляет 200 – 500 тыс. га. В среднем прибыль компаний от продажи зерна составляет 6-8 млрд. руб. Водные ресурсы берутся из крупных рек региона – р.Ишим и р.Омь [10].

Изменение количества водных ресурсов оказывает значительное влияние на сельское хозяйство. Рост растительности напрямую зависит от климатических и гидрологических факторов, при снижении влаги влияет на развитие растений. Длительные засухи или затопления могут привести к уничтожению больших площадей полей.

Для избежание больших убытков компании используют различные методы оптимизации производств. Увеличивают удобрения, меняют технологию засева и распашки, меняют оросительные системы. Главной задачей производителей является защита от засух и затоплений, чтобы повысить устойчивость к климатическим изменениям.

Научное сообщество также задается вопросом, как можно описать процесс оптимизации и сделать экономический прогноз, включающий оценку климатического влияния. Необходимо определить оптимальную стратегию использования водных ресурсов для различных целей, включая сельское хозяйство.

Расчет рисков в сельском хозяйстве включает в себя оценку потерь урожая из-за неблагоприятных климатических условий, неработоспособной техники, повреждения почвы, заболеваний растений. Полученные используются для разработки долгосрочных социально-экономических стратегий для региона. Понимание степени убытков обеспечивает понимание о рациональном использовании природных ресурсов в будущем.

Чтобы оценить экономический ущерб можно использовать различные методы. Например, метод прямой оценки, он используется для оценки работоспособности работающих несколько лет предприятий. Он позволяет оценить убытки предприятия и разработать план по модернизации производственных процессов. Метод сохранения доходов, который позволяет разработать план по устранению потерь и сохранению бюджета компании. Метод замещения, помогает оптимизировать производства за счет замены оборудования.

Оценка ущерба может быть полезна для принятия решений о мерах по уменьшению рисков и повышению устойчивости сельскохозяйственного производства. Также оценка ущерба может быть использована при рассмотрении вопросов о компенсации убытков и страховании рисков в сельском хозяйстве.

Для оценки ущерба методом прямой оценки необходимо определить объем потерянной продукции (в сельском хозяйстве - урожая) и умножить его на среднюю рыночную стоимость единицы производимой продукции. Полученное произведение будет являться оценкой ущерба.

У метода прямой оценки также есть минусы. Он не может учитывать все факторы, которые могут повлиять на процессы, приводящие к убыткам. Например, если урожай был утрачен из-за погодных условий, то оценка ущерба может не учитывать потери, связанные с уменьшением увлажненности земли.

Метод сравнения доходов и расходов – это метод расчета ущерба путем сравнения доходов и расходов в период до и после реализации стратегии

производства. Он позволяет оценить экономические последствия, учитывая все затраты и потери. Разница между ними будет являться оценкой ущерба.

Метод замещения ущерба для сельского хозяйства заключается в расчёте затрат на повторное возведение культур. Этот метод не учитывает затраты на оплату труда, стоимость расходных материалов, ресурсов.

Планирование социально-экономического развития является важным инструментом для определения приоритетных направлений развития региона и регламентирует действия различных производств, участвующих в его реализации.

Одним из самых часто используемых методов для оптимизации производства является расчет производственных функций. Производственная функция – математическая модель, позволяющая описать зависимость выходных параметров (урожайности) от входных (труд, капитал, ресурсы).

6.3 Методы построения производственных функций

Расчет производственной функции определяет оптимальные значения факторов производства для получения максимальной выгоды в различных отраслях экономики. Например, для сельского хозяйства производственная функция может использоваться для определения необходимого количества воды для орошения, которое определяет максимальный объем урожая.

Производственная функция – это экономико-математическая модель, которая описывает зависимость объема производства от входных факторов производства, таких как труд, капитал и земля. В общем виде производственная функция представляется в виде нормированной зависимости:

$$Q = f(K, L, Z), \quad (6.1)$$

где	Q	—	объем производства;
	K	—	капитал;
	L	—	труд;
	Z	—	земля.

Расчет производственных функций помогает оценить степень влияния изменения исходных параметров на объем итогового продукта. Рассмотрим пример из растениеводства. Уменьшение объемов орошения воды или снижение количества удобрений приводит к сокращению урожайности. При этом, стоит отметить, что чрезмерное увеличение исходных параметров, приводит к уменьшению продукции. Производственные функции способны учесть данные ограничения, так-как они основаны на линейных зависимостях.

Существует несколько методов расчета функций. Каждая из них имеет свои плюсы и минусы, и выбор конкретного зависит от конкретной задачи и доступных данных.

- Выражение производной функции Кубба–Дугласа:

$$Q = A \cdot K^\alpha \cdot L^\beta \quad (6.2)$$

где	Q	—	объем производства;
	K	—	капитал;
	L	—	труд;
	A	—	технологический прогресс;
	α и β	—	коэффициенты гибкости производства для капитала и труда.

- Метод наименьших квадратов. Заключается в аппроксимации нелинейных зависимостей доступных ресурсов. Он подразумевает минимизацию суммы квадратов отклонений величин. По опытным данным оцениваются функциональные аналитические значения. Явным минусом этого метода является то, что параметры должны быть количественно измеримы, нельзя использовать в оценке качественные показатели.
- Оценка параметров на выборках различной длины – самый простой способ построения. С помощью него производится оценка тенденций изменения факторов эффективности. Для расчета используется метод «скользящих периодов». Полная выборка параметров разбивается на подгруппы, и они сравниваются между собой.

Производственные функции используются для оптимизации производства и в управлении его ресурсами.

В гидрологии производственная функция чаще всего используется для оптимизации гидроэнергетики и сельского хозяйства.

Отрасль экономики, которая напрямую зависит от доступности природных ресурсов. Поэтому она является наиболее уязвимой к климатическим изменениям.

Производственная функция в сельском хозяйстве используется для определения оптимального количества водных ресурсов необходимых для максимизации дохода. Входными параметрами могут быть количество воды, доступной для орошения, увлажнение почвы, тип и количество используемых удобрений, стоимость семян.

Учет изменения гидрологического режима рек, в производственных функциях может помочь предприятиям аграрного сектора оптимизировать и регламентировать использование водных ресурсов и повысить эффективность производства. Таким образом, производственные функции являются полезным инструментом для сельского хозяйства и помогают

улучшить качество и количество производимых сельскохозяйственных культур.

Первый этап: определение зависимости между факторами, влияющими на производственные процессы и итоговым продуктом. Расчет производится физическим методом, который основан на использовании физических законов для получения продукции. Он может быть применен в различных областях, таких как гидроэнергетика, судоходство и сельское хозяйство [4].

В сельском хозяйстве основным продуктом является урожай, поэтому применяются математические модели, позволяющие описать зависимость между различными параметрами произрастания растений и урожайностью. Одной из таких моделей является модель В.В. Шабанова, которая позволяет описать зависимость урожайности (Y) от объема воды, подаваемой на орошение (W_{op}) [6].

Модель В.В. Шабанова учитывает множество факторов, влияющих на урожай растений, температуру воздуха, качество полива, атмосферные осадки, влажность почвы.

$$S = \frac{Y}{Y_{max}} \quad (6.3)$$

$$S = \left[\frac{(w_{opt} - w_0) \cdot \frac{M}{M_{opt}} + w_0}{w_{opt}} \right]^{Y w_{opt}} \cdot \left[\frac{1 - (w_{opt} - w_0) \cdot \frac{M}{M_{opt}} + w_0}{(1 - w_{opt})} \right]^{Y(1 - w_{opt})} \quad (6.4)$$

$$W_{op} = \frac{F_{op} \cdot M}{\eta} \quad (6.5)$$

где S – относительная урожайность;

- Y_{max} – максимально возможная в конкретных условиях урожайность, ц/га;
- F_{op} – площадь орошения, га;
- w_{opt} – оптимальная влажность почвы, %;
- w_0 – среднемноголетняя влажность почвы, %;
- M_{opt} – биологически оптимальная оросительная норма, м³/га.

Основным параметром, определяющим предельно возможный урожай для конкретного региона, является биологически оптимальная оросительная норма. При ее превышении урожайность начинает падать, а следовательно, увеличиваются экономические потери.

Второй этап: получение нормированных зависимостей выходных параметров (урожайности) от входных (капитал, труд и т.д.), основанных на фактических данных. Для этого используется статистический метод, позволяющих проанализировать данные [6]. В данном случае применяются фактические ряды наблюдений, которые включают в себя информацию о различных параметрах, таких как урожаи, увлажненность почвы, оросительные системы и другое. При этом производственная функция может быть представлена в виде зависимости между входными и выходными параметрами, которые включают в себя объемы воды, уровень удобрений, температуру и другие факторы, оказывающие влияние на производственный процесс.

$$Y=f(W) \quad (6.6)$$

- где Y – урожайность;
- M – оросительная норма;
- F – площадь орошения;

$\eta_{ор}$ – коэффициент полезного действия оросительной системы.

Урожайность j -ой культуры, обозначаемая как U_{ij} , зависит от нормы орошения, обозначаемой как M_{ij} .

$$U_{ij}=f(M_{ij}) \quad (6.7)$$

Объем воды, выделяемой j -ой культуре в i -ом варианте распределения водных ресурсов, влияет на оросительную норму M_{ij} :

$$M_{ij}=\frac{W_{ij} \cdot \eta_{ор}}{F_j} \quad (6.8)$$

где W_{ij} – объем водных ресурсов, выделяемый j -ой культуре в i -ом варианте распределения.

Удобно использовать нормированные зависимости. Нормированные зависимости представляют собой относительные значения выходных параметров по отношению к входным параметрам, что позволяет сравнивать эффективность различных производственных процессов и оптимизировать их:

$$S=f(W) \quad (6.9)$$

где W_{opt} – оптимальный годовой объем воды для орошения.

Третий этап заключается в определении взаимосвязи между чистым доходом производства и объемом воды. Данная связь устанавливается с помощью методов оптимизации, которые часто используются в аграрной промышленности, рыбная промышленность, водном транспорте. Основным показателем эффективности сельскохозяйственных производств является прибыль. Следовательно, основная цель расчета производственных функций

— повышение уровня экономической отдачи, с помощью рассмотрения всех возможных вариантов изменения ресурсов. Решение задачи оптимизации также позволяет грамотно распределить ресурсы между различными сельскохозяйственными культурами. В случае, если имеется N вариантов распределения водных ресурсов, производственная функция может быть представлена в виде зависимости между входными параметрами, такими как объемы воды, и выходными параметрами, такими как урожайность [6].

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = f(W) \quad (6.10)$$

где ЧД_{Σ} — суммарный чистый доход, получаемый от реализации урожая всех орошаемых сельскохозяйственных культур;
 W — объем воды, выделяемый для орошения конкретной культуры.

Этот критерий оптимизации, позволяющий максимизировать доход, может быть записан в виде:

$$\text{ЧД}_{\Sigma} \rightarrow \max \quad (6.11)$$

При этом суммарный чистый доход получается, как сумма доходов от орошения всех i -х культур:

$$\text{ЧД}_{\Sigma} = \sum \text{ЧД}_{ij} \quad (6.12)$$

где ЧД_{ij} — чистый доход, получаемый от орошения i -ой культуры в J -ом варианте распределения водных ресурсов.

Прибыль ЧД_{ij} определяется по зависимости:

$$\text{ЧД}_{ij} = \text{Ц}_{ij} - C_{ij} \quad (6.13)$$

где Ц_{ij} – стоимость продукции i -ой культуры в j -ом варианте распределения водных ресурсов;

C_{ij} – затраты на производство i -ой культуры в j -ом варианте распределения водных ресурсов.

Стоимость продукции j -ой культуры определяется по формуле:

$$\text{Ц}_{ij} = Y_{ij} \cdot F_j \cdot \text{ц}_j \quad (6.14)$$

где Y_{ij} – урожайность j -ой культуры в i -ом варианте распределения водных ресурсов;

F_j – площадь, занятая j -ой культурой;

ц_j – цена продукции j -ой культуры.

$$C_{ij} = c_i \cdot F_i \quad (5.15)$$

где c_i – удельные затраты на 1 га площади.

Четвертый этап: вероятностный анализ, который позволяет выявить наиболее вероятные значения доступного для орошения объема воды. Данный подход позволяет выделить группы с похожими значениями, что упрощает ансамблевый анализ

На основе результатов гидрологического моделирования для каждого сценария производится анализ распределения расходов воды. Данные разделяются на группы с шагом 5 м³/с. Чтобы оценить вероятности наступления тех или иных условий водообеспеченности, для каждой группы определяется ее доля в общем объеме данных. Далее для каждого кластера

определяется зависимость чистого дохода от объема воды. Это позволяет оценить экономическую эффективность производства при различных сценариях.

6.4 Проведение и анализ вероятностного расчета

На территории Западной Сибири основным направлением в растениеводстве являются зерновое производство. Самой распространённой зерновой культурой является яровая пшеница. Ее доля составляет 79% от общей посевной площади зерновых [11].

Оценка физических факторов производилась, используя характеристики яровых растений для Западной Сибири. Биологически оптимальная оросительная норма для яровых культур составляет 1110 м³/га [10]. Максимальная урожайность при оптимальных условиях может достигать 3,5 тонн/га. Площадь орошения зависит от количества доступных водных ресурсов, в среднем составляет 500 - 1000 га [29]. Из этого следует, что годовой объем, требуемый для орошения в среднем равен 1500 т/м³.

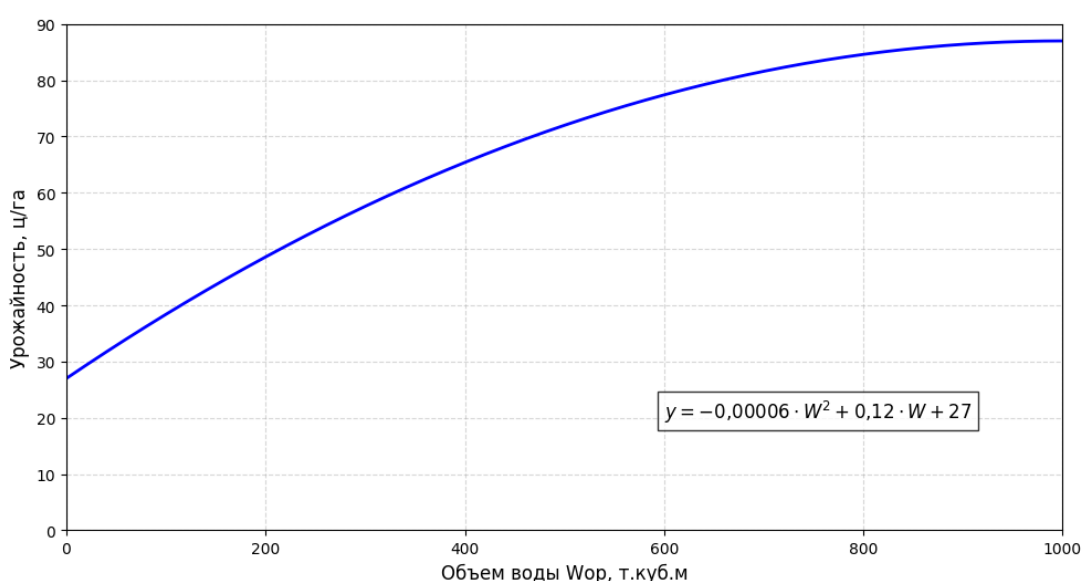


Рисунок 6.1 – Статистическая зависимость урожайности от объема подаваемой на орошение воды.

Урожайность напрямую зависит от объема воды, затрачиваемой на орошение (Рисунок 6.1).

Для оценки динамики урожайности, необходимо проанализировать входные параметры, зависящие от расположения и специфики сельскохозяйственного предприятия.

В регионе используются дождевальные системы полива. Средний коэффициент полезного действия (КПД) оросительной системы в Западной Сибири составляет 0,65 [10]. От качества работы поливных машин зависит оптимальная оросительная норма. При низких КПД большая часть воды теряется и не доходит до растений, это снижает урожайность.

Прибыль рассчитывается, как разница между выручки от урожая и суммарными затратами на возведение. Средняя цена за 1 тонну яровых культур равна 13500 рублей. Удельные затраты складываются из затрат на выращивание (25000 руб/гектар), стоимости водозабора (0,8 руб/м³), затрат на поддержание систем полива (10000 руб/га в сезон), стоимость уборки и хранения урожая (1000 руб/тонн) [10].

Необходимо также учесть ограничения на забор воды из поверхностных водных ресурсов. Он регламентируется пособием к СНиП 11-01-95 по разработке раздела проектной документации «Охрана окружающей среды» [25]. Согласно пособию, для сельскохозяйственных нужд нельзя превышать 75 % минимального среднемесячного расхода в год с 95 % обеспеченностью.

Для расчета и визуализации от орошения яровых полей прибыли написана программа (Приложение Е). В нее заложена вероятностная оценка производственных функций. В программе заложен механизм учета оросительной нормы, которая определяет необходимый объем воды. Алгоритм основан на нелинейной зависимости. При достижении плато урожайности, а в следствии чистый доход перестают расти. Итоговая столбчатая диаграмма наглядно показывает наиболее вероятные экономические показатели на 2050 год, учитывая климатические изменения.

Для каждой вероятностной группы были получены зависимости чистого дохода от объема воды доступного для орошения (Рисунки 6.2–6.10). Оранжевым показаны наиболее вероятные случаи.

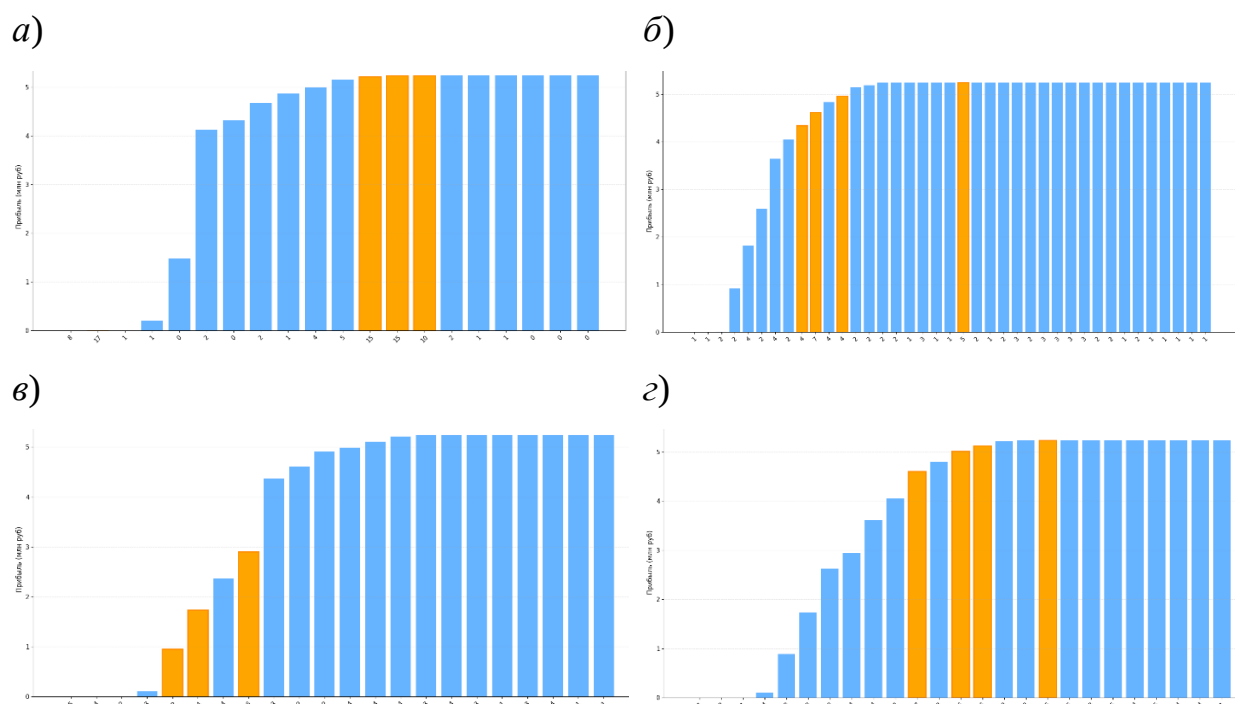


Рисунок 6.2 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Омь – г.Куйбышев: *а* – сценарий SSP1-2.6; *б* – сценарий SSP4-4.5; *в* – сценарий SSP3-7.0; *г* – сценарий SSP5-8.5.

Наиболее вероятные результаты в сценарии SSP1-2.6 демонстрируют модели: *GISS-E2-1-G*, *MPI-ESM1-2-LR*, *IMAGE 3.2* – 17 %. В сценарии SSP2-4.5: *NorESM2-LM*, *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2* – 5%. В сценарии SSP3-2.7: *UKESM1-0-LL*, *IPSL-CM6A*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 14 %. В сценарии SSP5-8.5: *MIROC6*, *CanESM5*, *UKESM1-0-LL* – 6 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f3*, *r7i1p1f*, *r1i1p1f1*, *r5i1p1f1*.

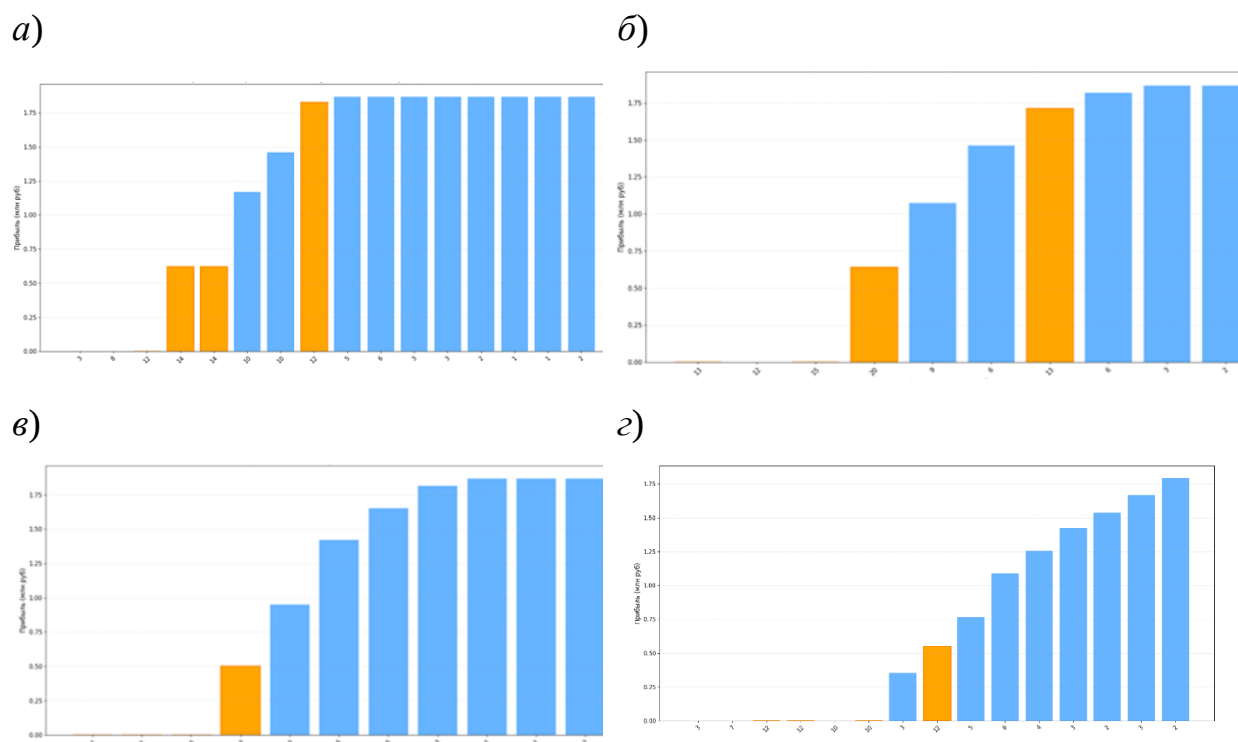
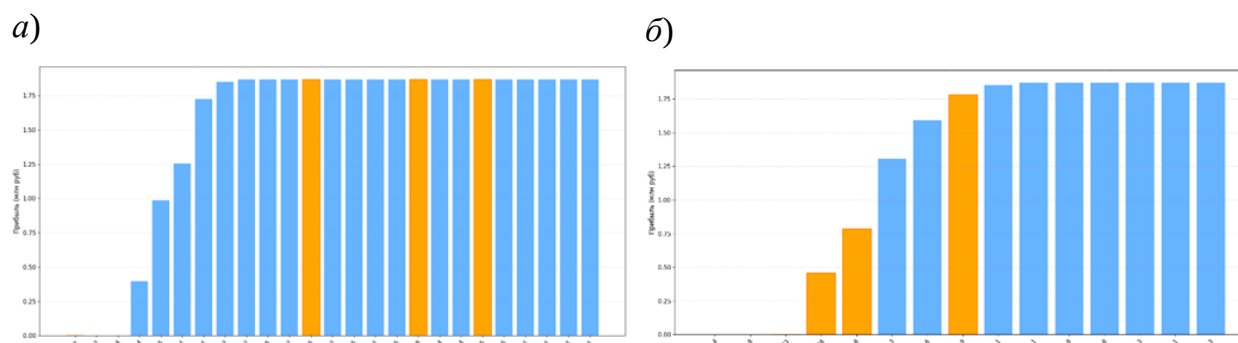


Рисунок 6.3 – Кривые обеспеченности Пирсона III типа для р.Омь – с.Крещенка: а – сценарий SSP1-2.6; б – сценарий SSP4-4.5; в – сценарий SSP3-7.0; г – сценарий SSP5-8.5

Наиболее вероятные результаты в сценарии SSP1-2.6 демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *IMAGE 3.2* – 12 %. В сценарии SSP2-4.5: *NorESM2-LM*, *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2* – 20 %. В сценарии SSP3-2.7: *UKESM1-0-LL*, *IPSL-CM6A*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 13 %. В сценарии SSP5-8.5: *MIROC6*, *CanESM5*, *UKESM1-0-LL* – 12 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f4*, *r7i1p1f1*, *r1i1p1f1*, *r6i1p1f1*.



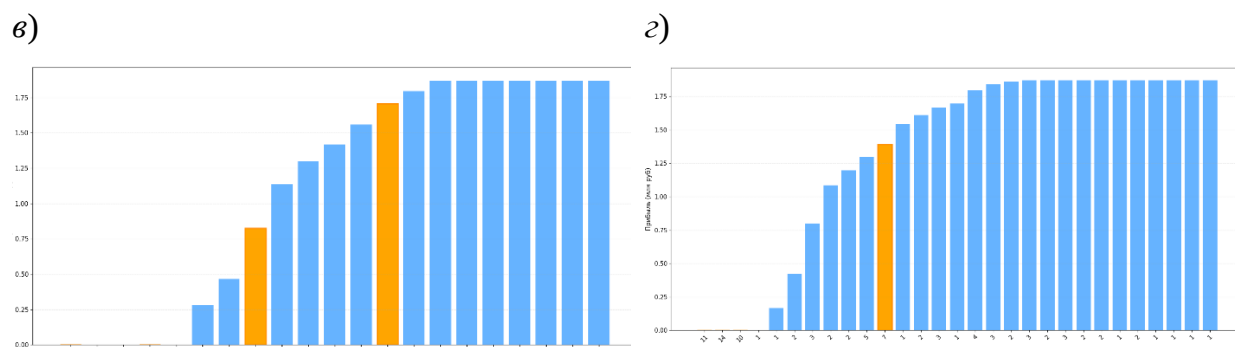


Рисунок 6.4 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Омь – г.Калачинск: *а* – сценарий *SSP1-2.6*; *б* – сценарий *SSP4-4.5*; *в* – сценарий *SSP3-7.0*; *г* – сценарий *SSP5-8.5*

Наиболее вероятные результаты в сценарии *SSP1-2.6* демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *IMAGE 3.2* – 11 %. В сценарии *SSP2-4.5*: *NorESM2-LM*, *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2* – 18 %. В сценарии *SSP3-2.7*: *MIROC6*, *IPSL-CM6A*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 11 %. В сценарии *SSP5-8.5*: *FGOALS*, *UKESM1-0-LL* – 14 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f4*, *r4i1p1f*, *r1i1p1f1*, *r6i1p1f1*.

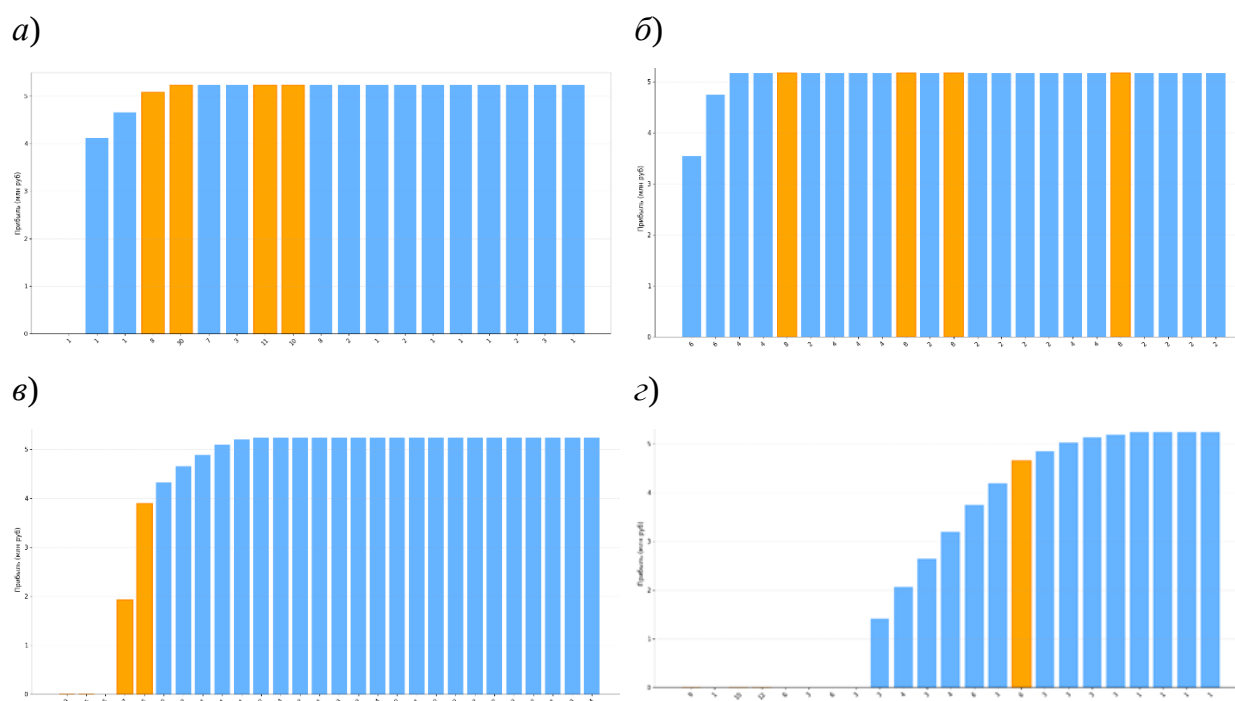


Рисунок 6.5 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Омь – с.Вознесенское: *а* – сценарий *SSP1-2.6*; *б* – сценарий *SSP4-4.5*; *в* – сценарий *SSP3-7.0*; *г* – сценарий *SSP5-8.5*

Наиболее вероятные результаты в сценарии *SSP1-2.6* демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *IMAGE 3.2* – 11 %. В сценарии *SSP2-4.5*: *NorESM2-LM*, *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2*, *CNRM-ESM2-1* – 8 %. В сценарии *SSP3-2.7*: *MIROC6*, *IPSL-CM6A*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 15 %. В сценарии *SSP5-8.5*: *FGOALS*, *UKESM1-0-LL* – 12 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f4*, *r4i1p1f*, *r1i1p1f1*, *r6i1p1f1*.

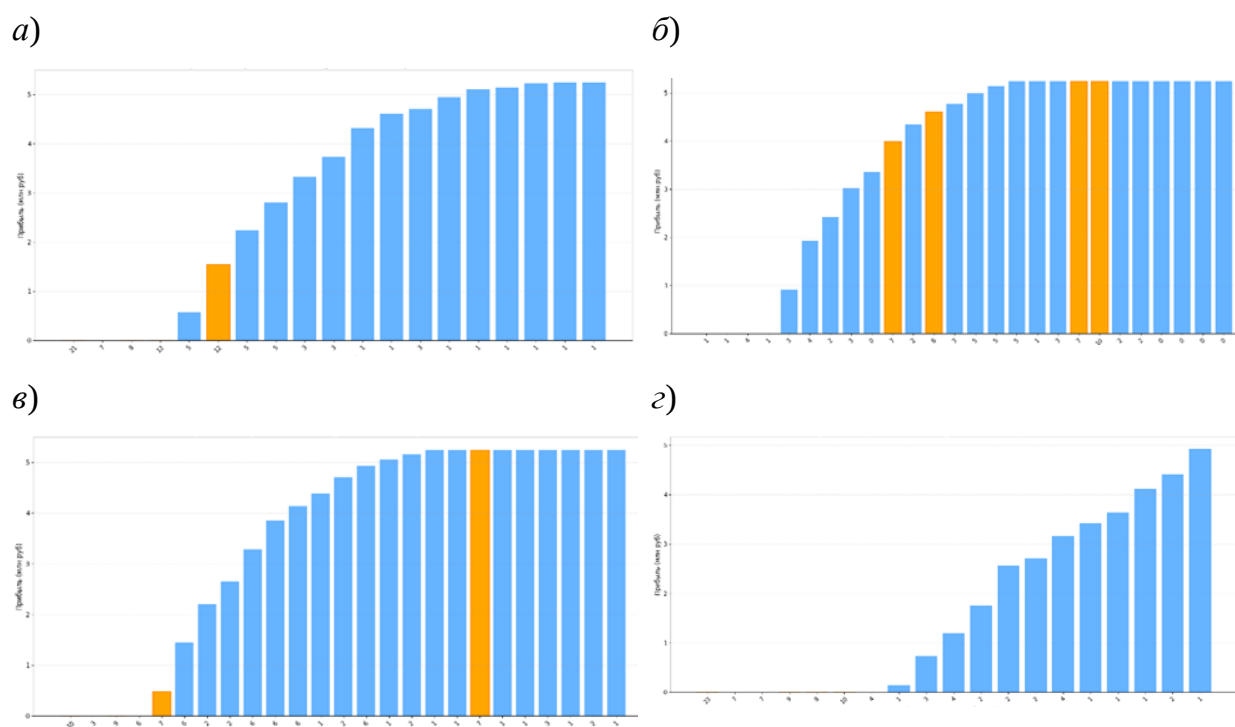


Рисунок 6.6 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Омь – с.Чумаково: *а* – сценарий *SSP1-2.6*; *б* – сценарий *SSP4-4.5*; *в* – сценарий *SSP3-7.0*; *г* – сценарий *SSP5-8.5*

Наиболее вероятные результаты в сценарии *SSP1-2.6* демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *IMAGE 3.2*, *GISS-E2-1-G* – 21 %. В сценарии *SSP2-4.5*: *NorESM2-LM*, *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2*, *CNRM-ESM2-1* – 10 %. В сценарии *SSP3-2.7*: *MIROC6*, *IPSL-CM6A*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 21 %. В сценарии *SSP5-8.5*: *FGOALS*, *EC-Earth* – 12 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f4*, *r1i1p1f*, *r7i1p1f1*.

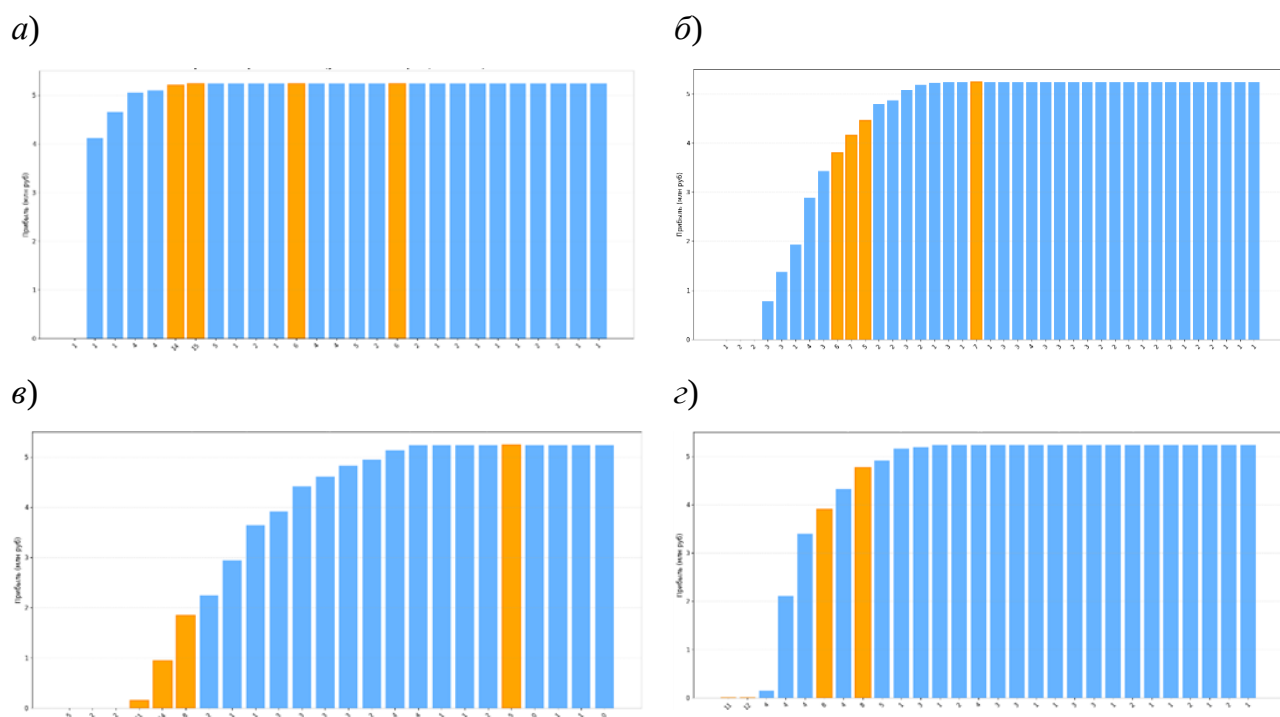
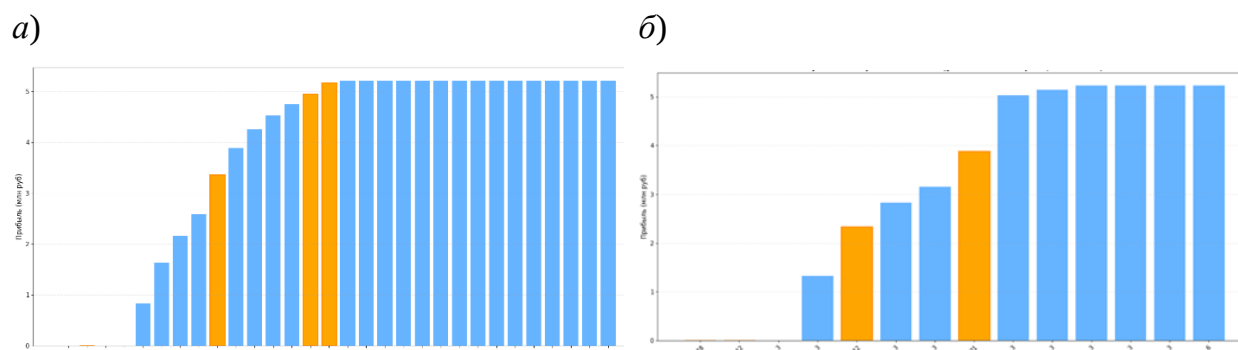
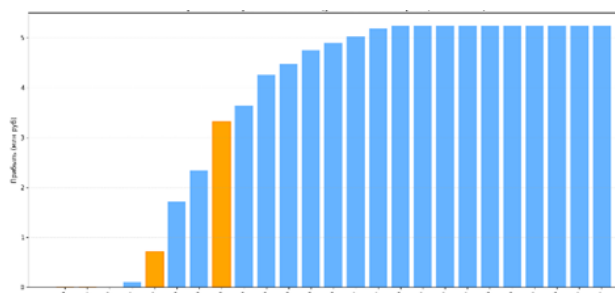


Рисунок 6.7 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Омь – г.Омск: *а* – сценарий *SSP1-2.6*; *б* – сценарий *SSP2-4.5*; *в* – сценарий *SSP3-2.7*; *г* – сценарий *SSP5-8.5*

Наиболее вероятные результаты в сценарии *SSP1-2.6* демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *IMAGE 3.2*, *GISS-E2-1-G* – 14 %. В сценарии *SSP2-4.5*: *NorESM2-LM*, *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2*, *CNRM-ESM2-1* – 7 %. В сценарии *SSP3-2.7*: *MIROC6*, *IPSL-CM6A*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 12 %. В сценарии *SSP5-8.5*: *FGOALS*, *EC-Earth* – 12 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f1*, *r1i1p1f1*, *r7i1p1f1*.



в)



г)

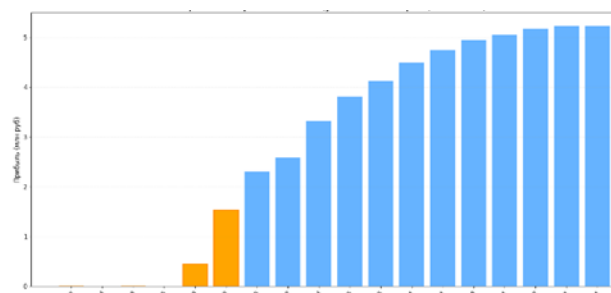
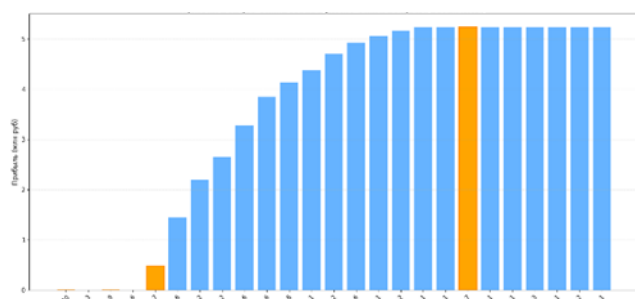


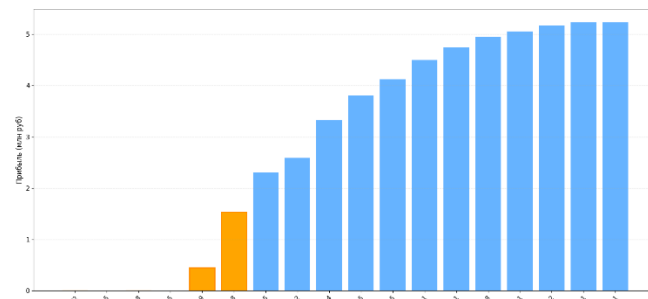
Рисунок 6.8 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Ишим – с.Викулово: а – сценарий SSP1-2.6; б – сценарий SSP2-4.5; в – сценарий SSP3-2.7; г – сценарий SSP5-8.5

Наиболее вероятные результаты в сценарии SSP1-2.6 демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *GISS-E2-1-G* – 8 %. В сценарии SSP2-4.5: *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2*, *CNRM-ESM2-1* — 21 %. В сценарии SSP3-2.7: *MIROC6*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 14 %. В сценарии SSP5-8.5: *FGOALS*, *EC-Earth*, *CanESM5-CanOE*, *HadGEM3* – 23 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f1*, *r1i1p1f1*, *r7i1p1f1*, *r1i1p2f1*.

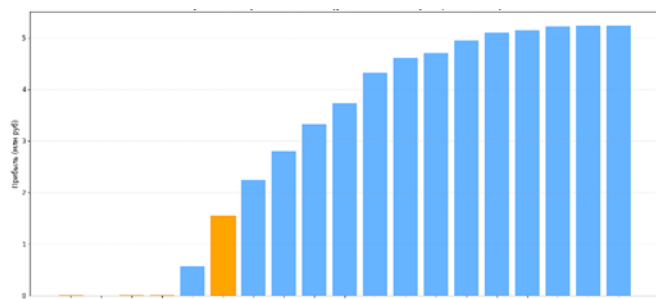
а)



б)



в)



г)

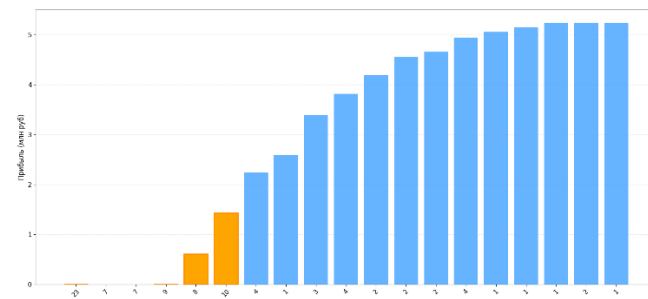


Рисунок 6.9 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Ишим – г.Ишим: а – сценарий SSP1-2.6; б – сценарий SSP2-4.5; в – сценарий SSP3-2.7; г – сценарий SSP5-8.5

Наиболее вероятные результаты в сценарии *SSP1-2.6* демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *GISS-E2-1-G* – 10 %. В сценарии *SSP2-4.5*: *MPI-ESM1-2-LR*, *CESM2*, *CNRM-ESM2-1* – 22 %. В сценарии *SSP3-2.7*: *MIROC6*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 21 %. В сценарии *SSP5-8.5*: *FGOALS*, *EC-Earth*, *CanESM5-CanOE*, *HadGEM3*, *ESM1-5* – 23 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f1*, *r1i1p1f*, *r5i1p1f1*, *r1i1p2f*.

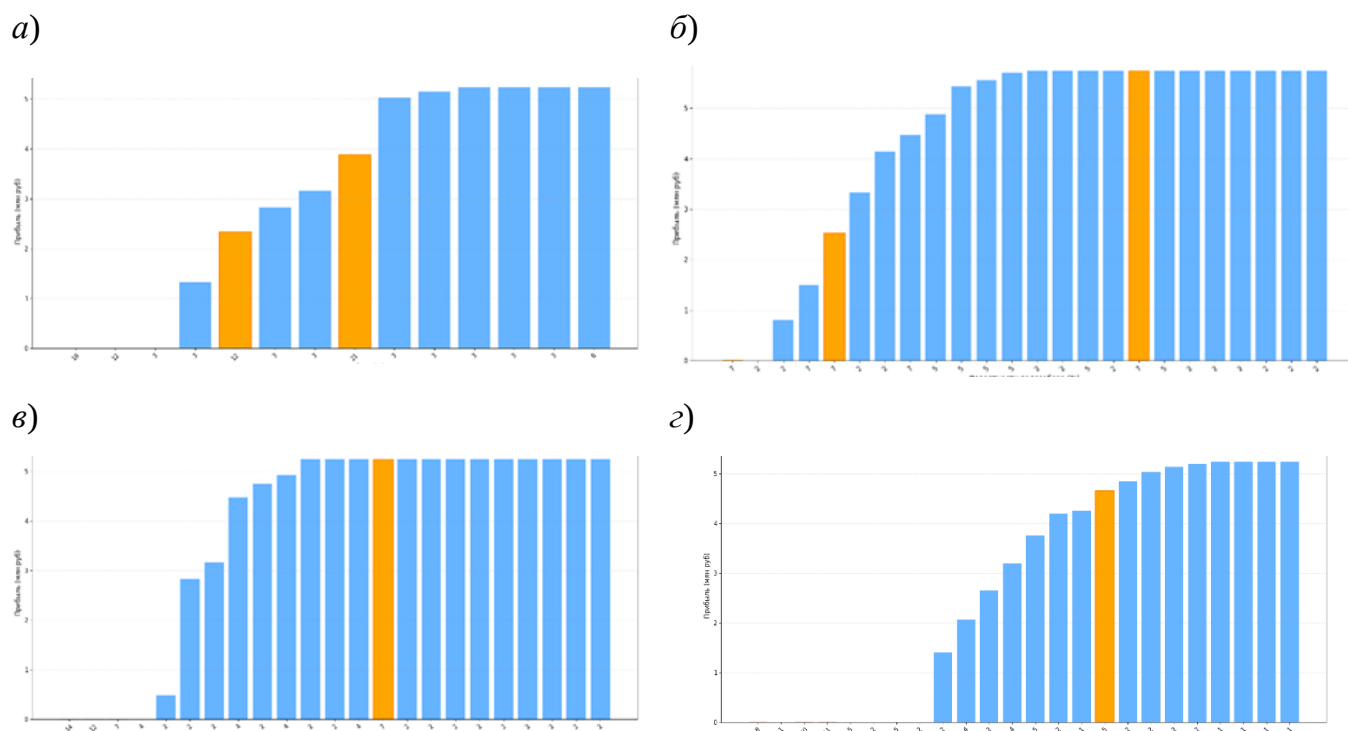


Рисунок 6.10 – Вероятностный расчет зависимости прибыли от доступного объема воды р.Ишим – с.Орехово: *а* – сценарий *SSP1-2.6*; *б* – сценарий *SSP2-4.5*; *в* – сценарий *SSP3-2.7*; *г* – сценарий *SSP5-8.5*

Наиболее вероятные результаты в сценарии *SSP1-2.6* демонстрируют модели: *MPI-ESM1-2-LR*, *GISS-E2-1-G* – 21 %. В сценарии *SSP2-4.5*: *MPI-ESM1-2-LR*, *CanESM5* – 7 %. В сценарии *SSP3-2.7*: *MIROC6*, *MPI-ESM1-2-LR*, *NorESM2-LM* – 14 %. В сценарии *SSP5-8.5*: *EC-Earth*, *CanESM5-CanOE*, *ESM1-5* – 2 %. Самые вероятные ансамблевые реализации: *r3i1p1f1*, *r1i1p1f*, *r5i1p1f1*, *r1i1p2f*.

6.5 Вывод

Разработанный подход для вероятностного расчета производственных функций, позволил получить комплексную оценку влияния доступных водных ресурсов на рентабельность сельскохозяйственных производств.

Наиболее положительным является сценарий *SSP1-2.6*, при нем достигается максимальная рентабельность. На некоторых гидрологических постах наблюдается достижение плато чистого дохода, но данный исход маловероятен. Даже модели устойчивого пути демонстрируют нехватку водных ресурсов, с большой вероятности на некоторых постах. Необходимо задуматься об оптимизации производственных процессов. В районе реки Ишим необходимо увеличить площадь засева. Для реки Омь необходимо заменить оросительную систему на более продуктивную с КПД 85–90%.

Сценарии *SSP3-2.7* и *SSP2-4.5* показывают менее оптимистичные результаты, на многих постах наблюдается нехватка водных ресурсов. Например, на ГП р. Омь – с. Викулово множество групп достигают плато, но они составляют меньшую долю от общего числа моделей, чем те, что демонстрируют понижение объема воды.

Наибольший разброс показателей показал самый жесткий сценарий. *SSP5-8.5* демонстрирует значительное снижение доходов из-за уменьшения доступного объема воды для орошения. При этом также есть группы моделей с меньшей вероятностью наступления, которые демонстрируют значительное увеличение водных ресурсов. Можно заметить, что реки с большей площадью водосбора, р. Ишим, демонстрирует неоднородные результаты, хотя наиболее вероятно объема воды будет катастрофически не хватать. Даже для бассейна крупной реки рекомендуется сократить площадь посевных полей.

Вероятностный расчет позволил выделить наиболее вероятные результаты и разработать план адаптации к прогнозируемым изменениям. Необходимо задуматься над адаптацией сельскохозяйственных производств Западной Сибири. Самый первый и простой шаг, который можно выполнить,

это замена ирригационных систем на более производительные. Это потребует значительных вложений капитала сейчас, но сохранит и приумножит чистый доход в будущем. В дальнейшем стоит построить зернохранилища, чтобы в более урожайные годы сохранить продукцию. Также необходимо задуматься о регулировании стока рек, для сохранения водных ресурсов в многоводные фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были рассмотрены проблемы изменения климата и проведена оценка их влияния на сельскохозяйственные производства. Вероятностный расчет производственных функций позволяет учитывать стохастическую составляющую, где выходные параметры зависят не только от детерминированных факторов, но и от случайных изменений.

В ходе работы выполнены все поставленные задачи:

- А) Проанализированы краткие физико-климатические характеристики водосборов рек Ишим и Омь;
- Б) Проведен анализ доступных научных исследований, рассматривающих проблемы производственного планирования водозависимых производств, в условиях изменяющегося климата;
- В) Подготовлены исходные гидрометеорологические данные за ретроспективный период;
- Г) Проведен ретроспективный анализ моделей сценариев 6-го оценочного доклада МГЭИК;
- Д) Подготовлены метеорологические данные глобальных климатических моделей;
- Е) Проведен расчет многолетних гидрологических характеристик;
- Ж) Проведен сравнительный анализ прогнозных и фактических данных;
- З) Разработан алгоритм вероятностной оценки показателей производительности водозависимого производства с учетом изменения климатических характеристик;
- И) Проведен вероятностный расчет производственных функций для сельского хозяйства.

Анализ показал, что климатические факторы оказывают значительное влияние на рентабельность водозависимых производств.

Выводы включают следующие ключевые положения:

а) Климатические изменения оказывают влияние на гидрологический режим водных объектов. Колебание количества осадков и приземной температуры влияют на распределение стока. Это влияет на объем доступной воды для орошения полей.

б) В рамках работы сформулированы рекомендации по адаптации сельскохозяйственных производств к климатическим изменениям.

в) Исследование подтвердило возможность использования вероятностных расчетов производственных функций для социально-экономического развития.

г) Многолетняя динамика стока играет важную роль в сельском хозяйстве, влияя на работу оросительных систем. От количества доступного объема воды для полива зависит урожайность культур.

д) Для объективной оценки экономических последствий изменения статистических показателей стока применительно к региону Российской Федерации – Западной Сибири – рекомендовано использование разработанной методики оценки потерь для водозамисимых производств.

Список использованных источников

- 1 CIMP6 / [Электронный ресурс] // ESGF MetaGrid : [сайт]. – URL: <https://aims2.llnl.gov/search> (дата обращения: 14.05.2025).
- 2 Макаревич А.А., Яротов А.Е. Речной сток и русловые процессы [Текст] / А.А. Макаревич, А.Е. Яротов – 1. – Минск: Минск БГУ, 2019 – 116 с.
- 3 Макоско А.А., Матешева А.В. Об экспресс-оценке климатического риска при стратегическом планировании пространственного развития России / А.А. Макоско, А.В. Матешева [Текст] // Стратегическое планирование. – Москва:Инновации, 2020. – С. 3–11.
- 4 Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Винокуров Ю.И., Зиновьев А.Т., Кириллов В.В., Красноярова Б.А., Рыбкина И.Д., Котовщиков А.В., Дьяченко А.В. Современное состояние и экологические проблемы Обь-Иртышского бассейна [Текст] / А.В. Пузанов, Д.М. Безматерных, Ю.И. Винокуров, А.Т. Зиновьев, В.В. Кириллов, Б.А. Красноярова, И.Д. Рыбкина, А.В. Котовщиков, А.В. Дьяченко // Водное хозяйство России. – 2017. – № 6. – С. 106–118.
- 5 Штаковский А.В. Укрупненные нормы водопотребности для орошения по природно-климатическим зонам СССР [Текст] / А.В.Штаковский – 1. – МОСКВА: Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР, 1984 – 359 с.
- 6 Тихонова А.М. ВКР: Вклад природных ресурсов в производственные функции при изменении климата. – 2023: РГГМУ, 2023. – 126 с.
- 7 Тихонова А.М., Гайдукова Е.В. Вклад водных ресурсов в производственные функции при изменении климата / Гидрология и океанология–2024 : сборник материалов конференции студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ 19 апреля 2024 г./ – Казань:Бук, 2024. – С. 158–163.
- 8 Тихонова А.М., Гайдукова Е.В. Вклад природных ресурсов в производственные функции при изменении климата / Всероссийская научно-

практическая конференция им. Жореса Алфёрова: сборник тезисов статей. – Санкт-Петербург: «Директ-Медиа», 2023. – С. 77–78.

9 Тихонова А.М., Гайдукова Е.В., Девятов В.С. Вклад природных ресурсов в производственные функции при изменении / Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: ИГУ, 2023. – С. 233–239.

10 Ольгаренко В., Капустина Т.А., Ольгаренко Д.Г., Цекоева Ф.К. планирование водопользования при орошении сельскохозяйственных культур [Текст] / В. Ольгаренко, Т.А. Капустина, Д.Г. Ольгаренко, Ф.К. Цекоева – Москва: Минсельхоз России, 2014 – 172 с.

11 Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года / [Электронный ресурс] // government.ru : [сайт]. – URL: <http://government.ru/docs/10049/> (дата обращения: 08.05.2025).

12 Гидрологический ежегодник 1961 Том 6. Бассейн Карского моря (западная часть). Выпуск 0-3. Река Обь и ее бассейн до устья р. Иртыш [Текст] / {surnames_reversed} —: Гидрометеорологическое издательство, 1965 – 424 с.

13 Гидрологический ежегодник 1961 Том 6. Бассейн Карского моря (западная часть). Выпуск 4-9. Бассейны рек Иртыша, Оби ниже устья р. Иртыша и рек Обской губы к западу до границы с Баренцевым морем [Текст] / {surnames_reversed} —: Гидрометеорологическое издательство, 1965 – 424 с.

14 Ишим / [Электронный ресурс] // Рувики : [сайт]. – URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Омь> (дата обращения: 20.05.2025).

15 Акентьева Е.М., Анисимов О.А. и др. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме [Текст] / Е. М. Акентьева, О. А. Анисимов, М. Ю. Бардин, С. А. Журавлев, В. М. Катцов, А. А. Киселев, М. В. Ключева, П. И. Константинов, В. Н. Коротков, А. Г. Костяной, О. Н. Липка, А. С. Макаров, В. П. Мелешко, В. Н. Павлова, Т. В. Павлова, А. А. Постнов, Е. Н. Разова, Б. А. Ревич, член-

корреспондент РАН С. В. Рязанцев, Е. И. Хлебникова, И. М. Школьник, В. В. Ясюкевич – 3. – Санкт-Петербург: Научные технологии, 2022 – 124 с.

16 Шевнина Е.В. Долгосрочная оценка статистических характеристик максимального стока на территории российской Арктики: специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» : Диссертация на соискание кандидата технических наук / Е.В. Шевнина; Российский государственный гидрометеорологический университет. – Санкт-Петербург, 2015. — 344 с.

17 Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В. Моделирование гидрологических процессов. Учебник. Изд. 2-е исправ. и доп. – СПб., изд. РГГМУ, 2006. – 559 с. (первое издание Коваленко В. В. Моделирование гидрологических процессов. – СПб., изд. РГГМУ, 1993. – 256 с.)

18 Коваленко В. В., Викторова Н. В., Гайдукова Е. В., Громова М. Н., Хаустов В. А., Шевнина Е. В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате [Текст] / В. В. Коваленко, Н. В. Викторова, Е. В. Гайдукова, М. Н. Громова, В. А. Хаустов, Е. В. Шевнина — 1. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2010 — 50 с.

19 Коваленко В.В. Сценарная оценка долгосрочных изменений максимального стока весеннего половодья в Арктическом регионе России на основе стохастической модели формирования многолетнего стока [Текст] / В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Н.В. Викторова, В.А. Хаустов, А. А. Дегтярев, Е. Ю. Голованова, Л. И. Лесничий, Е.В. Шевнина // Труды Всероссийской научной конференции «Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования стока» – ИВП, 2012. – С. 100–106.

20 МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Пачаури, Р. К., Райзингер, А., и основная группа авторов (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 104 с.

21 Методические рекомендации по составлению справочника по водным ресурсам СССР, вып. 7 ч. 1. Половодье [Текст]. – Л.: изд. И, 1962. – 107 с.

22 Моисиенко Н.А. Агрогидрологические основы орошения в степной зоне [Текст] / Н.А. Моисиенко – 1. – Ленинград : Гидрометиздат, 1972 – 214 с.

23 Наставление по службе прогнозов, раздел 3. Ч. I. Прогнозы режима вод суши [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 198 с.

24 Омь / [Электронный ресурс] // Рувики: [сайт]. – URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Омь> (дата обращения: 20.05.2025).

25 Пособием к СНиП 11-01-95 по разработке раздела проектной документации «Охрана окружающей среды» п. 6.12 – Москва, ФГУП «ЦЕНТРИНВЕСТпроект». 2006 – 114 с.

26 Пузанов Александр Васильевич, Балыкин Сергей Николаевич, Балыкин Дмитрий Николаевич, Салтыков Алексей Владимирович Микроэлементы и радионуклиды в почвах лесного пояса бассейна верхней Оби / Пузанов Александр Васильевич, Балыкин Сергей Николаевич, Балыкин Дмитрий Николаевич, Салтыков Алексей Владимирович [Текст] // Мир науки и образования №2. – Новосибирск: УДК, 2000. – С. 8–13.

27 Состояние поверхностных вод / [Электронный ресурс] // АИС ГМВО: [сайт]. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505> (дата обращения: 20.05.2025).

28 СП 33–101–2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. — 73с.

29 Шибанова Алена Алексеевна, Силантьева Марина Михайловна Хозяйственно-ценные, редкие и исчезающие виды растений поймы реки Оби (верхнее течение) / Шибанова Алена Алексеевна, Силантьева Марина Михайловна [Текст] // Мир науки и образования №2. – Новосибирск :УДК, 2000. – С. 23–26.

30 Шикломанов, И.А. Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата / И.А. Шикломанов, В.Ю. Георгиевский – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2008. – С. 159–163.

Приложение А – Листинг программы для распаковки данных глобальных климатических моделей МГЭИК (осадки)

Приложение Б – Листинг программы для распаковки данных глобальных климатических моделей МГЭИК (температура)

Приложение В – Листинг программы для прогноза стока рек

Приложение Г – Листинг программы для расчета ординат кривой обеспеченности Пирсона III

Приложение Д – Листинг программы для построения кривых обеспеченности

Приложение Е – Листинг программы для вероятностного расчета производственной функции на примере сельского хозяйства на территории Западной Сибири