

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи
УДК [556.162.06:004.9](282.254.6)

Джалалванд Али

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕГОДОВОГО СТОКА РЕК
ИРАНА

Специальность 25.00.35 –Геоинформатика (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:доктор техн. наук, профессор
В.Г. Бурлов

Научный консультант:кандидат техн. наук, доцент
Е.В. Гайдукова

Санкт-Петербург 2020

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Сокращения	5
Введение	6
1 Анализ гидрометеорологических условий Ирана и постановка задач исследований	16
1.1 О необходимости разработки ГИС управления водопользованием	16
1.2 Карты Мирового водного баланса и имеющиеся данные гидрометеорологических наблюдений по Ирану	18
1.3 Тенденции и сценарии изменений глобального климата	21
1.4 Построение и обоснование карт характеристик годового стока и испарения с бассейнов рек Ирана	29
1.5 Гидрологические характеристики многолетнего годового стока рек Сефидруд и Карун	29
1.6 Годовое испарение с водосборов рек Сефидруд и Карун	49
1.7 Постановка задач исследований	59
2 Сравнительная характеристика современного методического аппарата прогнозирования стоков рек	63
2.1 Методика прогнозирования кривых плотности вероятности годового стока	63
2.2 Аprobация методики для Ирана (ретроспективные оценки)	68
2.3 Выбор климатической модели для оценки гидрологических последствий изменения климата в речных бассейнах Ирана	75
2.4. Разукрупнение масштабов моделей	78
3 Методические основы совершенствования прогнозов стока на основе условных вероятностных характеристик обеспеченности стока рек	92

3.1	Долгосрочная оценка вероятностных характеристик речного стока Ирана	92
3.2	Оценка устойчивости прогнозных карт	99
3.3	Долгосрочная оценка вероятностных характеристик испарения Ирана	99
4	Прогнозные оценки гидрометеорологических характеристик речных бассейнов Ирана на основе условных вероятностных характеристик обеспеченности стока рек	105
4.1	Совместное вероятностное распределение речного стока и испарения	106
5	Метод обоснования требований к формированию геоданных для информационного обеспечения ГИС управления водопользованием	123
5.1	Общий подход к разработке метода	123
5.2	Условия системной интеграции процесса формирования геоданных (характеристик показателей речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов) и процесса формирования управленческого решения	127
5.3	Естественно–научный подход к синтезу модели системной интеграции процесса формирования геоданных и процесса решения человека	129
5.4	Общий подход к синтезу модели решения при управлении водопользованием	131
5.5	Синтез модели управления водопользованием без учета требуемых ресурсов прогнозирования характеристик геоданных	135
5.6	Синтез модели управления водопользованием с учетом требуемых ресурсов прогнозирования характеристик геоданных	144
	Заключение	156
	Список использованных источников	161

Приложение А –Оценка гидрометеорологических условий Ирана	179
Приложение Б –Материалы к оценке гидрологических последствий изменения климата в речных бассейнах Ирана	189
Приложение В –Оценка гидрологического режима рек Ирана при изменении климата	205
Приложение Г –Эмпирические гистограммы, эллипсы рассеивания и поверхности вероятности	225
Приложение Д – Прогнозные поверхности вероятности	238
Приложение Е –Кривые обеспеченности	244
Приложение Ж – Листинг программы по интерполяции данных климатических моделей	253
Приложение З – Листинг программы визуализации взаимодействия двух фазовых переменных	259
Приложение И –Листинг программы по визуализации прогнозных поверхностей вероятности	261

СОКРАЩЕНИЯ

- ВМО – Всемирная метеорологическая организация
- ФПК – Фоккер–Планк–Колмогоров
- РИК – разностно-интегральная кривая
- МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата
- СКО – среднеквадратическое отклонение
- ИРИ – Исламская Республика Иран

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Исламская Республика Иран принадлежит к группе стран Среднего Востока. Более 80 % территории Ирана находится в областях Земли, где преобладают аридный, семиаридный и субгумидный типы климата с малым количеством осадков или полным их отсутствием [47, 48]. Поэтому проблема нехватки воды для Ирана, в силу его расположения в зоне с сухим и полусухим климатом, всегда являлась чрезвычайно актуальной [103].

Дополнительно ситуацию с организацией водопользования усложняет процесс глобального потепления на Земле [69, 41, 100].

Доклады и исследования организаций и ученых по всему миру показывают, что климат планеты меняется [69, 41, 100]. Почти все гидрометеорологи соглашаются с фактом потепления климата. Поскольку изменение климата может оказать влияние на системы водных ресурсов, возникает проблема, связанная с оценкой этого влияния на экономику и экологию [1, 56, 73]. Поэтому в таких сложных климатических условиях повышенное требование предъявляется к водохозяйственной деятельности, управление которой осуществляется государством в лице специально уполномоченных органов управления совместно с органами местной власти. Это обозначает деятельность, включающую планирование и организацию реализации технических, технологических, финансовых и организационных мер по обеспечению водопоставки и водопользования. Особое значение в условиях ИРИ является управление водопользованием – формирование спроса на воду [74, 75, 65, 64, 44].

Подтверждением важности такой деятельности для Исламской Республики Иран является поиск путей расширения партнерства в управлении водными ресурсами. Этот вопрос обсудил в Тегеране с представителями

руководства Ирана посол Германии в ИРИ Михаэль Клор-Берхтольд. Об этом сообщает ИА «*Fars News*» 25.01.2019 [63]. Как передает информгентство, в ходе встречи дипломат отметил: согласно прогнозам ряда экспертов, к 2050 году около 200 млн. человек могут стать беженцами по причине засухи в местах их проживания. В свете такой перспективы становится все более актуальной необходимость создания совместных проектов в сфере водопользования и сохранении запасов питьевой воды [63].

Одним из основных составляющих управления водопользованием, так и управления другими процессами является прогнозирование. Поэтому заблаговременно необходимо выявить изменения и оценить долгосрочные вероятностные характеристики многолетнего речного стока, в первую очередь – годового, который является индикатором обеспеченности водопотребления водных ресурсов.

В РГГМУ разработана методология, которая успешно применяется для прогнозирования различных видов речного стока России. Возникает важная научная задача адаптации и апробации этой методологии к условиям Ирана (засушливая и полузасушливая страна) [30, 35].

При решении задачи прогнозирования характеристик речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов в интересах управления водопользованием, важно обеспечить возможность хранения и обработки пространственных, географических данных, что входит в предмет построения и функционирования ГИС, которые объединяет в единую систему пространственную информацию и информацию других типов для решения пространственно-временных задач управления водопользованием. Поэтому дополнительно к задаче прогнозирования возникает важная научная задача обоснования требований к спрогнозированным характеристикам гео-данных ГИС управления водопользованием.

ГИС управления водопользованием определяется решаемыми в ней научными и прикладными задачами. Они должны быть выстроены в ряд по

мере усложнения и наращивания возможностей управления моделируемыми объектами и процессами.

В большинстве случаев ГИС создаются на основе обширных банков и баз данных цифровой информации, куда кроме картографических материалов включаются данные многолетних непосредственных наблюдений, статистические сведения, данные дистанционного зондирования.

Рассматриваемая тема настоящей диссертации с точки зрения «Наук о Земле» с одной стороны лежит в русле научных исследований кафедры гидрофизики и гидропрогнозов, направленных на разработку и практическое применение многомерных распределений, которые описывают процесс формирования многолетнего речного стока. С другой стороны, настоящая тема лежит в русле исследований Института информационных систем и геотехнологий РГГМУ, занимающегося разработкой теории построения и функционирования ГИС. Например, в [21, 88, 102], это положение обосновано тем, что современные системы управления водопользованием основаны на применении спрогнозированных характеристик речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов. А это связано с обеспечением возможности хранения и обработки пространственных, географических данных, что составляет уже предмет теории построения и функционирования ГИС.

В общем случае при управлении водопользованием необходимо работать с трехмерными распределением характеристик геоданных $p(Q, E, \Delta U)$, так как уравнение годового баланса речного бассейна содержит сток, испарение и изменение суммарных влагозапасов. Подобные многомерные распределения нужны при решении задач, не только связанных с изменением климата, но и для получения устойчивых кривых обеспеченности, которые используются в проектной практике.

Рассмотренная совокупность факторов определяет актуальность настоящих исследований, целью которых, является следующее.

Цели и задачи исследования.

Целью настоящей диссертации является разработка и адаптация для условий Ирана методики прогнозирования характеристик речного стока, и испарения на базе совместного учета вероятностных распределений этих характеристик с возможностью их сценарной оценки, наглядного пространственного, визуального представления их реализации в ГИС управление водопользованием.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- создана геоинформационная база для последующей оценки текущего гидрометеорологического режима и параметризации прогностических (сценарных) моделей вероятностных характеристик многолетнего годового стока рек Ирана – Сефидруд и Карун;
- выполнено геоинформационное отображение, в виде графической визуализации пространственно-координированных данных, оценок расчетных характеристик речного стока и испарения на 2020–2049 и 2050–2079 гг. для водосборов рек Карун и Сефидруд для экстремальных климатических сценариев; выявлены статистически значимые отклонения прогнозных характеристик от фактических;
- разработана методика получения условных кривых плотности вероятности из теоретических двумерных поверхностей плотности вероятности $p(Q, E)$ с целью формирования базы знаний геоинформационной системы управления водопользованием;
- построены и проанализированы безусловные и условные распределений стока с целью оценки устойчивости решений прогностического уравнения в качестве реализации задачи интеллектуального контроля развития сложных геопространственных процессов;
- построены совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения для современного климата и для климатических сценариев на XXI век для водосборов Ирана с целью моделирования и распознавания типовой ситуации с использованием интегрированных данных и их сопоставления с опорными ситуациями, имеющимися в базе знаний;

- разработана методика сценарного прогноза условных кривых плотности вероятности с целью обоснования требований к формированию интеллектуальной поддержки принятия решения;

- разработан метод обоснования требований к прогнозированию характеристик геоданных ГИС управления водопользованием.

Научная новизна исследования.

В результате решения сформулированных задач были получены следующие основные результаты:

- создана объединенная совместная синхронизированная (впервые) база данных по речному стоку и испарению с водосборов Ирана, в которую вошло 56 рядов, применимых для практического использования при 5 %-ом уровне статистической значимости;

- впервые для Ирана получены двумерные распределения для расхода воды и испарения $p(Q, E)$ по 28 водосборам, на основе которых рассчитаны безусловные и условные распределения обеспеченности речного стока, по которым проведено сравнение и анализ различных обеспеченностей при переходе от безусловных к условным распределениям;

- впервые построены совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения (для условных и безусловных распределений) для условий современного климата и для наиболее вероятного (*RCP2.6*, *RCP8.5*, модели *ensemble*, *MPI-ESM-MR*, *CESM1(CAM5)* и *BCC-CSM1(1M)*) климатического сценария;

- впервые построены фактические и сценарные поверхности плотности вероятности речного стока.

Степень разработанности темы.

Одним из преимуществ интеллектуальных геоинформационных систем является способность генерировать и отображать модель объективно складывающейся обстановки на территориях речных бассейнов на основе данных статистических расчетов изменений гидрологических характеристик. Основным критерием оценки динамической модели является степень

изменчивости свойств объектов обстановки в пределах временных рамок (циклов) принятия управленческих решений.

Наиболее распространенный подход в оценке долгосрочных изменений гидрологических характеристик основан на моделях в виде систем уравнений водного баланса с различным шагом дискретизации по времени. Подобные модели разрабатываются в ГГИ (Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Бабкин В.И. и др.) и в СПбГУ (Виноградова Т.А. и др.) на кафедре гидрологии суши.

Для решения задач диссертационного исследования подобные гидрологические оценки последствий изменения климата не подходят, так как не прогнозируют обеспеченные величины гидрологических характеристик.

Другой подход в моделировании гидрологических последствий изменения климата предполагает использование стохастических моделей формирования стока. Например, в ИВП РАН предложены негауссова линейная модель многолетних колебаний речного стока с двумерным входным процессом и нелинейные стохастические модели (Фролов А.В., Соломонова И.В.). На кафедре гидрологии суши МГУ обоснована применимость стохастической модели колебания стока рек с паводочным режимом, в которую вошли эмпирические зависимости с метеозементами (Христофоров А. В.).

На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ разработана методология вероятностного прогнозирования гидрологических последствий изменений климата, в основе которой лежит стохастическая модель формирования стока в виде уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова, которое в стационарном случае переходит в уравнение Пирсона (но уже с раскрытым физическим смыслом его коэффициентов), и дает в качестве решения кривые плотности вероятности из семейства кривых Пирсона. Методология широко апробирована и используется для прогноза основных видов стока (годового, максимального и минимального).

Методология РГГМУ взята за основу в исследованиях диссертации, так как адаптирована для инженерных расчетов, включает расчетные выра-

жения, дающие устойчивые решения, использует общедоступные гидрометеорологические исходные данные.

Теоретическая значимость определяется:

- результатами исследования, которые позволяет более полно использовать полученные характеристики геоданных ГИС управления водопользованием для оценивания возможностей системы управления водопользованием в условиях экстремальных сценариев гидрологической обстановки Ирана;

- разработанными методическими основами построения и функционирования геоинформационной системы прогнозирования характеристик геоданных (речной сток, испарение, водонасыщение), которые могут быть использованы для исследования развития системы управления водопользованием Ирана;

- разработанным методом обоснования требований к прогнозированию характеристик геоданных ГИС управления водопользованием, который позволяет обосновать пригодность разрабатываемых систем управления на основе сформулированного в работе условия обеспечения требуемого уровня показателя эффективности функционирования системы.

Практическая значимость определяется:

- методическими основами построения и функционирования геоинформационной системы прогнозирования среднегодового стока рек Ирана в условиях экстремальных сценариев в интересах использования в оперативной практике организациями управления водохозяйственной деятельностью Ирана;

- полученными двумерными эмпирическими распределениями $p(Q, E)$ по 28 водосборам, а также построенными совместными одномерными многообразиями обеспеченности стока и испарения для экстремальных климатических сценариев, которые могут быть использованы для решения гидрологических задач различного вида в Иране.

– возможностями метода обоснования требований к характеристикам геоданных ГИС управления при развитии системы управления водохозяйственной деятельностью Ирана.

Научная обоснованность и достоверность результатов работы основывается на том обстоятельстве, что результаты статистических оценок и выводы, сделанные на их основе в ходе исследования, получены либо в рамках, существующих в настоящее время, гидрологических нормативов, либо базируются на моделях Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) и Пирсона, прошедших апробацию на многочисленных мировых речных водосборах.

Методологическая основа исследований и исходный материал. Основа исследований диссертации состоит из двух составляющих.

Первая предназначена для формирования характеристик геоданных управления водопользованием. Решение поставленных задач определения характеристик геоданных основывалось как на использовании классических методов инженерной гидрологии (статистическая обработка сформированных совместных рядов стока и испарения), так и на методологии частично инфинитного моделирования, разработанной в РГГМУ. В основе примененных методов прогнозирования лежали варианты модели линейного формирующего фильтра, обеспечивающие устойчивость решений за счет полной или частичной разгрузки от мультипликативного шума. Модель в различных вариантах прошла апробацию на сотнях речных бассейнах Южной и Северной Америки, Африки и Евразии.

Вторая составляющая, направленная на разработку модели построения и функционирования ГИС управления водопользованием, основана на достижениях научной школы «Системная интеграция процессов государственного управления», зарегистрированной в Реестре Ведущих научных и научно-образовательных школ Правительства Санкт-Петербурга [49]. Эта школа использует естественно-научный подход, базирующийся на законе сохранении целостности объекта [7, 84, 88].

Реализация вычислений осуществлялась на персональном компьютере на базе среды разработки *Visual Basic*, *MatLab* и приложении ГИС-технологий.

Исходным материалом для проведения расчетов служили ряды гидрометеорологических элементов, опубликованные в изданиях Всемирной метеорологической организации. Сценарные оценки выполнялись на базе пятого доклада (CMIP5) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC).

Положения, выносимые на защиту.

а) Геоинформационная модель распределения расчетных гидрометеорологических характеристик речных бассейнов Ирана для фактических и сценарных климатических условий.

б) Методика получения условных кривых плотности вероятности речного стока из теоретических поверхностей плотности вероятности стока и испарения для текущего и будущего климата.

в) Методика текущей и сценарной оценки обеспеченности стока речных бассейнов рек Ирана на основе построения совместных одномерных многообразий стока и испарения;

г) Метод обоснования требований к прогнозированию характеристик геоданных ГИС управления водопользованием.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на заседании Итоговой секции Ученого Совета РГГМУ в 2016 г., и семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов гидрологического факультета РГГМУ. Также промежуточные результаты работы были представлены на конференциях, в том числе: XI Всероссийская научная экологическая конференция (Санкт-Петербург, 2016), XI всероссийская научная экологическая конференция «Вода – источник жизни на Земле» (Санкт-Петербург, 2016), XIII Международный Большой географический фестиваль «Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета» (Санкт-Петербург, 2017), V Международная научно-практическая

конференция «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий» (Санкт-Петербург, 2018).

Диссертационное исследование выполнялось в рамках Научно-исследовательской работы (НИР) «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» (№ гос-регистрации 01 2014 58678). Результаты исследования внедрены в учебный процесс РГГМУ по специальности 05.04.05 – Прикладная гидрометеорология (направленность (профиль) – Прикладная гидрология) и переданы в Гидрометцентр Ирана.

По теме диссертации опубликовано 14 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 в высокорейтинговом зарубежном издании.

Личный вклад автора. Научные положения, выносимые на защиту, получены лично автором. В публикациях, подготовленных в соавторстве, автору принадлежат формулировка задач, сбор и обработка исходных данных по речным бассейнам Ирана.

1 АНАЛИЗ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ИРАНА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 О необходимости разработки ГИС управления водопользованием

Единство воды как великой природной субстанции требует, чтобы управление водными ресурсами осуществлялось комплексно, интегрировано, имея в виду интеграцию различных видов вод на земле, всех видов пользователей и всех видов последствий, которые определяют, будет ли существование воды устойчиво, эффективно и безвредно. Таким образом, интегрированное управление водными ресурсами (ИУВР) вполне доступно пониманию и рассматривается в настоящее время как определенная цель, которая воспринимается и признается человечеством и его политическими лидерами в многочисленных декларациях, решениях, лозунгах.

Чтобы удовлетворить человеческие и природные потребности, т. е. нужды ныне живущих людей и их потомков, естественной флоры и фауны – всего того, что создано Природой, нужно учесть и преодолеть все преграды, разъединяющие человечество.

Ранее мы утверждали, что цель ИУВР – добиться баланса ресурсов воды в пространстве и времени при ее использовании (поэтому важна интеграция всех видов вод и всех видов пользователей), но не менее важна и интеграция последствий. Последствия имеют обратные связи, которые могут воздействовать и на интегрируемые источники вод и на их пользование.

Как известно, антропогенные воздействия уменьшают ресурсы воды (или доводят их до параметров, при которых они не могут быть использо-

ваны) или ухудшают их качество (минерализация, загрязнение, эвтрофикация) или удорожают их обслуживание и возможность использования.

Одним из основных инструментов управления поверхностными водами является модель, и ГИС-технология представляет взаимосвязь между пространственными физико-географическими и гидрологическими данными. Кроме этого ГИС-технологии имеют способности (манипулирования, анализа и представления информации, привязанной к различным местоположениям). С другой стороны, гидрологический цикл имеет динамические системы, элементы которых варьируются не только во времени, но и пространственно. ГИС-технология дает возможность гидрологам интегрировать различные данные (географические пространственные данные), различными операциями и приложениями к управляемой системе, которая может быть использована в качестве подходящего инструмента для решения проблемы водных ресурсов в глобальном масштабе. Способность ГИС для записывания, хранения, анализа и, наконец, представления всех типов географических пространственных данных, являются причинами для использования ее в науке о земле исследователями [105]. В методике прогнозирования многолетнего среднегодового стока использовались базы знаний геоинформационной системы, предназначенной для сбора, представления географических пространственных данных и анализа пространственно-координированных данных о моделировании речного стока.

Реализация условий водопользования базируется на соответствующем процессе управления. Технология такого управления сводится к преобразованию информационных и деятельностных ресурсов в интересах достижения цели деятельности. Управление водопотреблением использует информационные ресурсы в виде пространственных данных и связанных с ними непространственных, а также получение на их основе информации и знаний о географическом пространстве. Такой вид информационных ресурсов используется в геоинформационных системах (ГИС). К основным компонентам ГИС относят технические (аппаратные), программные сред-

ства и информационное обеспечение. Управление водопользованием основано на прогнозировании среднегодового стока рек Ирана. Поэтому особый научный и практический интерес представляет формирование информационного обеспечения ГИС для прогнозирования среднегодового стока рек Ирана в виде пространственных данных, а также получение на их основе знаний о географическом пространстве.

1.2 Карты мирового водного баланса и имеющиеся данные гидрометеорологических наблюдений по Ирану

Иран расположен в Западной Азии, граничит с Каспийским морем на севере, и Персидским заливом и Оманским морем на юге. Иран вторая по площади страна на Ближнем Востоке (после Саудовской Аравии) и 18-я по величине страна в мире с площадью 1,648,195 км². Иран имеет 5440 км сухопутных границ и 2440 км водных границ с соседями: Афганистаном и Пакистаном на востоке, Туркменистаном, Азербайджаном и Арменией на севере; Турцией и Ираком на западе; и Арабскими государствами Персидского залива на юге.

У Ирана разнообразная топография (рисунок 1.1). Самая низкая точка в стране находится на южном побережье Каспийского моря (28 м ниже уровня моря) и самой высокой точкой является Гора Дамаванд (5,671 м над уровнем моря), расположенная недалеко от Каспийского побережья. Около 90 % территории Ирана находится в пределах иранского нагорья. Четверть территории страны – это пустыни и только четверть пригодна для сельскохозяйственных работ, остальная территория – это горы и нагорья.

Иран обладает небольшой климатической изменчивостью, в основном находится в субтропическом поясе высокого давления (рисунок 1.2).

Температура воздуха изменяется значительно (от -20 до $+50$ °C) по всей стране и в течение года. Январь характеризуется средней температурой от -6 до 21 °C, а июль – от 19 до 39 °C. Годовое количество осадков составляет 413 миллиардов кубических метров, но эта величина сильно варьируется по всей стране, колеблясь от меньше чем 50 мм в центре Ирана и около 1000 мм на побережье Каспия. Среднее количество осадков составляет около 250 мм в год, меньше чем одна треть от среднегодовых осадков на глобальном уровне. Большая часть страны получает менее 100 мм осадков в год, и 75% осадков выпадает только на 25% территория страны (рисунок 1.3). Большинство территорий (65%) страны считаются засушливыми, 20% полусухливыми, а остальные имеют влажный или умеренный климат. По всей стране протекает несколько крупных рек, и только одна река судоходна [106].

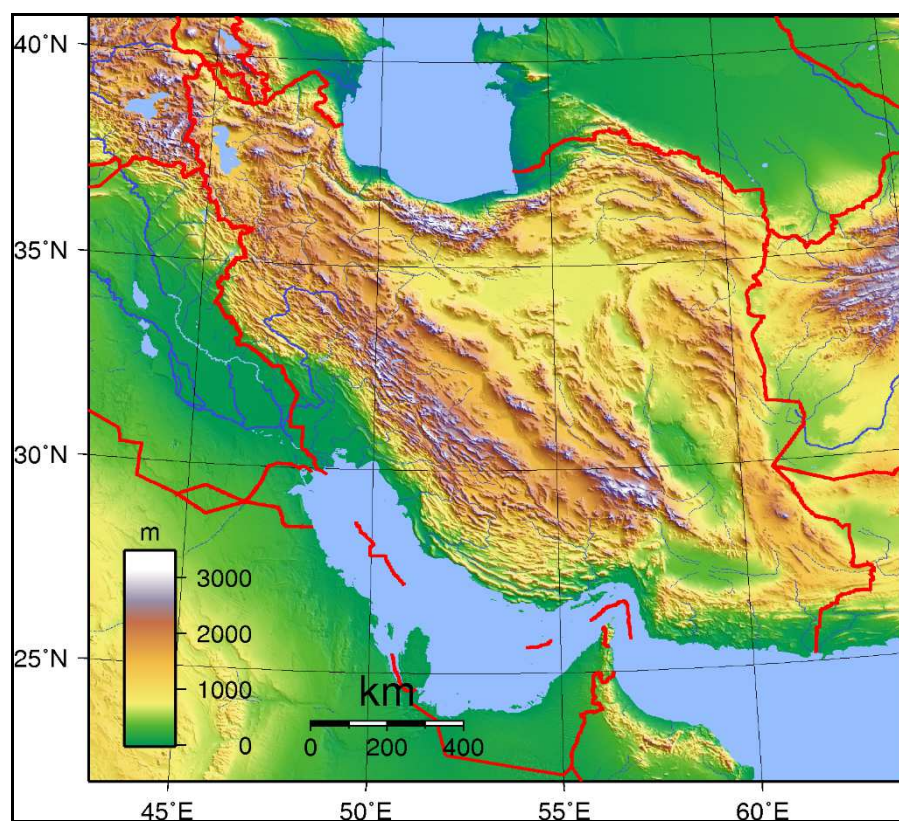


Рисунок 1.1 – Физико-географическая карта Ирана [101].

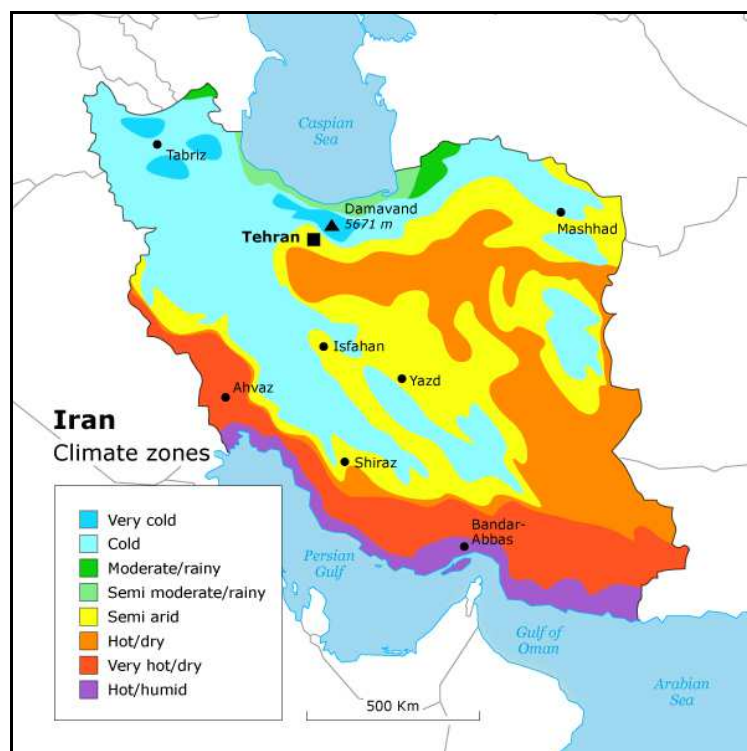


Рисунок 1.2 – Климатическая карта Ирана [92].

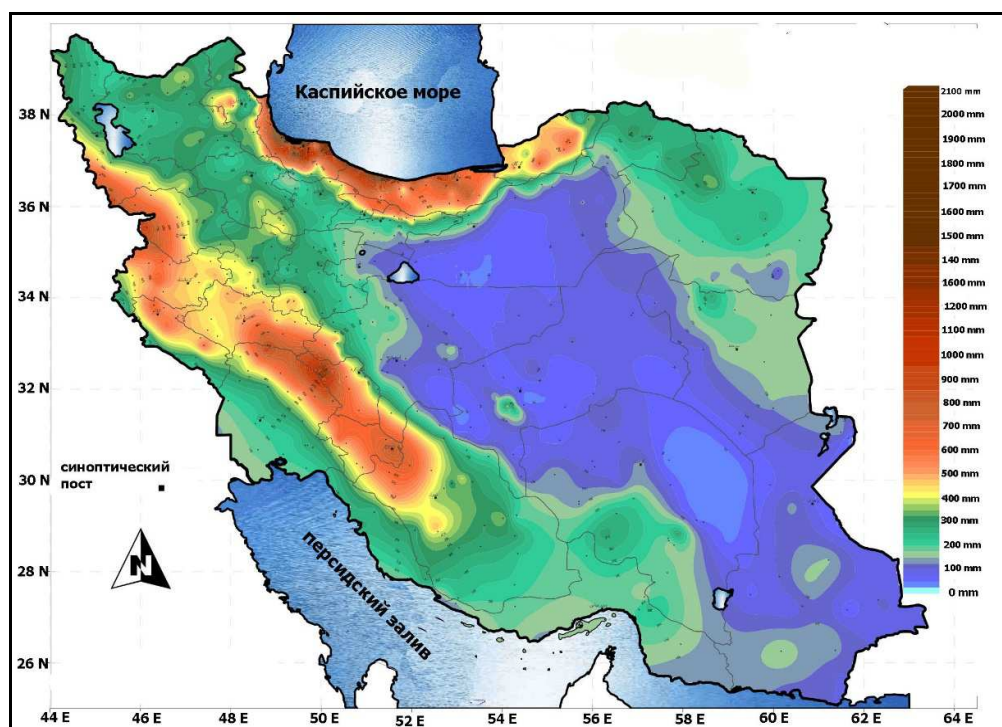


Рисунок 1.3 – Карта распространения осадков по территории Ирана [78].

1.3 Тенденции и сценарии изменений глобального климата

Быстрый рост народонаселения Ирана, миграция, а также последствия изменения климата, ведут к растущей нехватке водных ресурсов внутри страны. Рост спроса на воду, как техническую, применяющуюся в сельском хозяйстве и промышленности, так и, в особенности, на чистую (питьевую), стал одной из самых важных проблем и вопросов нынешнего века. Данный вопрос актуален не только для стран, не обеспеченных в должной мере пресной водой, но и для развитых стран. Поэтому для оптимального использования имеющихся водных ресурсов (их правильного регулирования и восполнения), в том числе в проблемных регионах на подобие Ирана, моделирование гидрологических явлений может быть оптимальным решением для их правильного развития [117]. Существует глубинная связь между гидрологическими циклами и климатической системой. Любое изменение климата влияет на все элементы гидрологического режима. В доклад МГЭИК говорится о том, что изменение климата, вызванное глобальным потеплением, за последние несколько десятилетий привело к изменению гидрологического режима во всем мире [124].

Изменение климата и изменения элементов гидрометеорологического цикла, таких как изменение интенсивности, продолжительности и времени осадков, засухи и наводнения, таяние ледников, повышение уровня моря, и также изменение скорости испарения с поверхности озер и водохранилищ, может оказать серьезное воздействие на водные ресурсы региона. Эти климатические изменения совместно с другими причинами (антропогенными факторами) имеют серьезное воздействие на объем и качество доступной воды. Изменение климата может влиять непосредственно на водные ресурсы, или косвенно через его воздействие на других факторы. Изменение климата может привести к изменению срока, величины и продолжительности осадков и

т.д., что может напрямую повлиять на запасы водных ресурсов, их устойчивость и восполняемость [83].

Глобальное потепление, вероятно, приведет к глобальному изменению гидрологического цикла. Доказательства этому уже есть. Так, в некоторых регионах наблюдается увеличение частоты наводнений и засух и изменения в долгосрочных тенденциях осадков. Меры по уменьшению степени последствий изменения климата (в том числе сокращение выбросов парниковых газов, защиты лесов, применение экологически чистой технологии) хотя и замедлят его изменение, но не могут и не смогут остановить или обратить вспять в обозримом будущем. В то же время общество ряда стран уже сейчас готово адаптироваться к ожидаемым изменениям и нуждается лишь в грамотном управлении. Цель адаптации – повысить устойчивость и надежность существующих систем управления водных ресурсов и приспособить свои потребности к различным вариантам будущих климатических сценариев [83].

Негативные последствия изменения климата на нашей планете являются одними из самых опасных проблем современного человечества и входят в ТОП-10 угроз 21-го века, наряду с глобальной пандемией, бунтом машин и угрозой применения ядерного оружия массового поражения [108].

Можно сказать, что изменение климата является изменением статического распределения параметров погоды. Эти изменения продолжаются в течение длительного времени (например, от нескольких десятилетий до миллионов лет) [91]. Реагирование на проблемы воздействия изменений климата и его влияния на водные ресурсы требуется как на региональном, так и на национальном уровне и должно подразумевать под собой выработку адаптационной стратегии.

Как упоминалось ранее, изменения климата Земли в будущем было признано одной из наиболее важных проблем, с которыми человеческое общество будет сталкиваться в наступившем столетии. Межправительственная Группа Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК) в настоящее время является главным международным органом, в сферу деятельности которого

входит оценка последних научных исследований по изменению климата. Во всем мире МГЭИК признается правительствами как самый надежный и достоверный источник отслеживающий изменение климата [95]. МГЭИК была зарегистрирована в 1988 году, как организация созданная для оценки риска глобального изменения климата, в том числе вызванного техногенными факторами (действия человека) и для информирования заинтересованных лиц (правительств) о текущем состоянии научных исследований об изменении климата и его потенциальных экологических и социально-экономических последствиях [123].

Первый доклад об оценке состояния изменения климата на планете был сделан в 1990 году. В последствие подобные доклады подготавливались каждые 6–7 лет. Кроме того, ежегодно публикуются оценочные доклады, в которых представляются результаты и выводы комплексного исследования климатических изменений, их причин и факторов, и возможных последствий, а также анализа потенциала по принятию адаптационных мер и снижению антропогенного воздействия на климатическую систему на двух уровнях, глобального и регионального [53]. В Пятом докладе содержатся доказательства того, что различные компоненты климатической системы Земли изменяются. Например, глобальная средняя температура воздуха с 1880-х годов увеличилась и период с 2001 по 2010 год был самым жарким десятилетием (рисунок 1.4).

Более 90% дополнительно поступающего в атмосферу тепла поглощается океаном. С увеличением температуры воздуха, содержание тепла также в океане поднимается и, следовательно, его температура растет [53]. За последние два десятилетия Гренландский и Антарктический ледниковые покровы теряли свою массу, ледники продолжали сокращаться практически во всем мире, площадь морского льда в Арктике и весеннего снежного покрова в Северном полушарии продолжала уменьшаться [42] (рисунок 1.5). Средние темпы роста повышения уровня моря с середины девятнадцатого века пре-

вышают аналогичные за предыдущие два тысячелетия (средний глобальный уровень моря повысился на 0,19 м (рисунок 1.6) [42].

Кроме того, нельзя оставлять без внимания такой фактор, влияющий в т.ч. и на изменение климата, как внешнее радиационное воздействие (ВРВ) – как наиболее эффективный способ передачи теплоты. Радиационное воздействие, как известно, является разницей между инсоляцией (солнечным светом), поглощенной Землей, и энергией, излучаемой обратно в космос. Положительное радиационное воздействие означает, что Земля получает больше входящей энергии от солнечного света, чем излучает в космос. В настоящее время суммарное радиационное воздействие является положительным и, следовательно, климатическая система получает больше радиационного тепла. Самый значительный вклад в суммарное радиационное воздействие вносит повышение концентрации CO_2 в

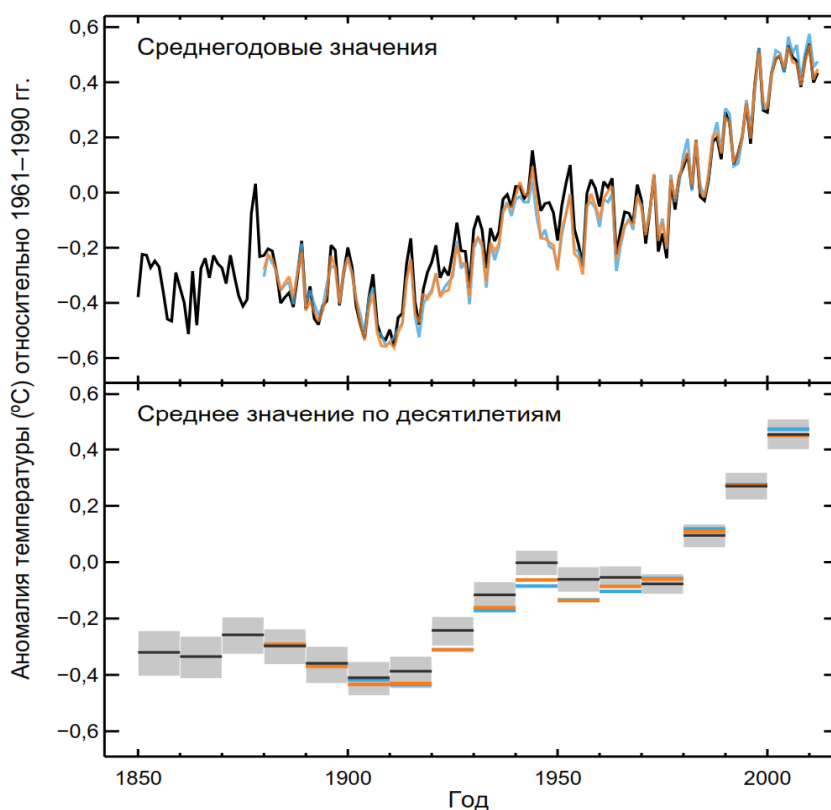


Рисунок 1.4 – Изменения температуры поверхности суши и поверхности океана в период 1850–2012 гг. [42].

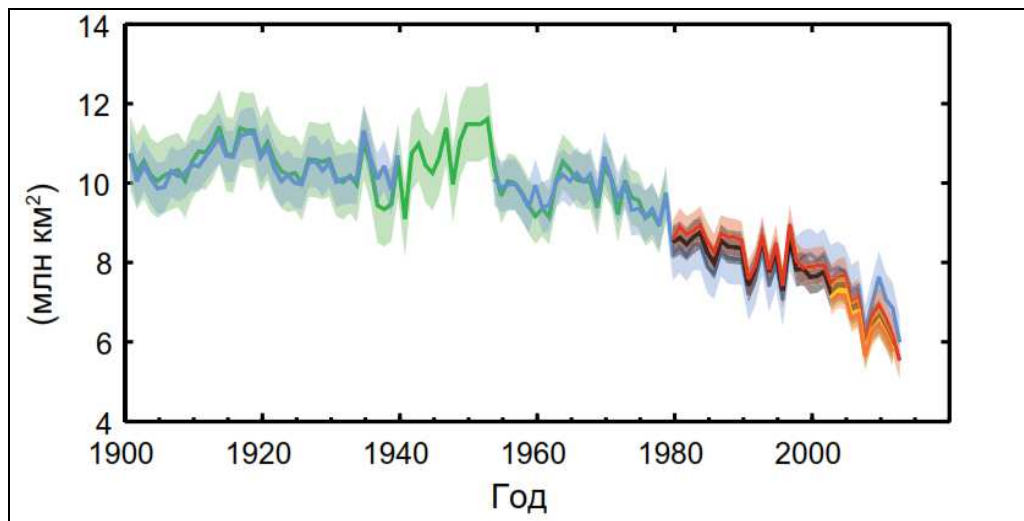


Рисунок 1.5 – Площадь морского льда в летний период в зоне Арктики [42].

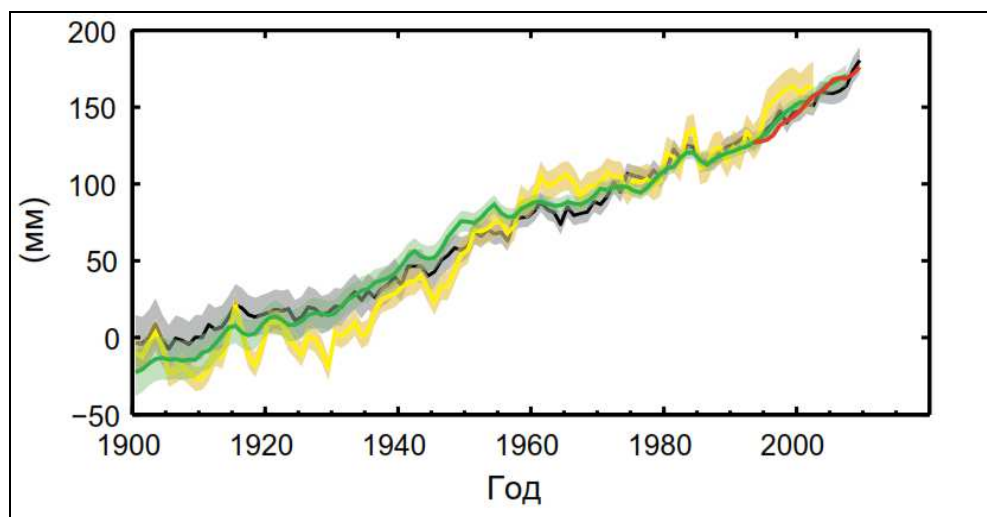


Рисунок 1.6 – Изменение среднего глобального уровня моря [42].

атмосфере планеты (один из известных парниковых газов в нашей атмосфере, который с 1750 года неуклонно повышается). Нарушение энергетического баланса Земли приводит к глобальному потеплению. Наблюденные данные и результаты моделирования изучения изменений температуры свидетельствуют именно об этой реакции Земли [42]. На рисунке 1.7 показано, что наблюдаемое потепление объясняется человеческой деятельностью.

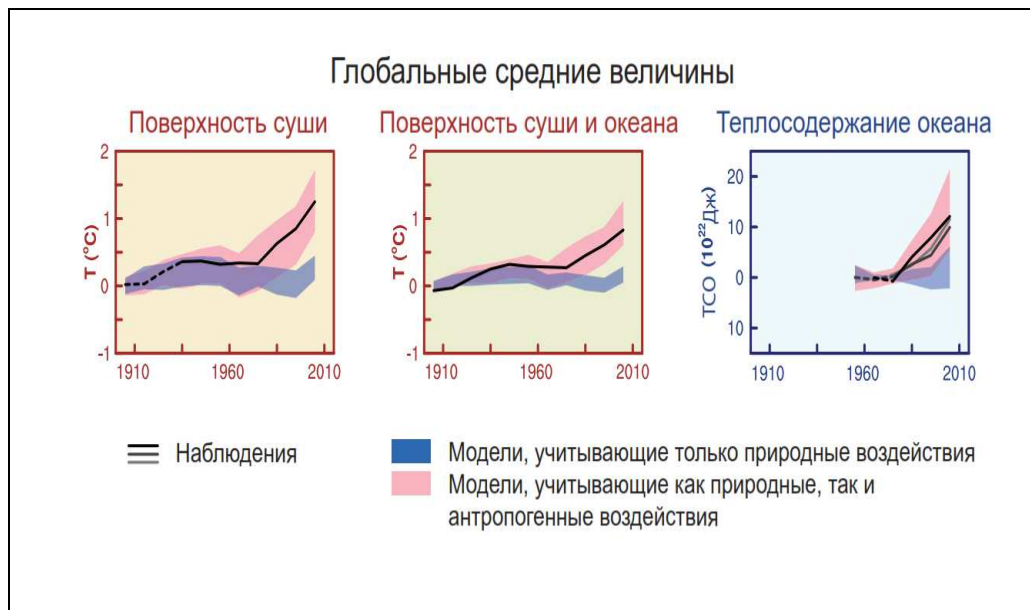


Рисунок 1.7 –Сравнение изменения климата между наблюдаемыми и моделируемыми [42].

Репрезентативная траектория концентрации (РТК)

Ученые-футуристы, изучающие климат Земли должны учитывать ряд факторов. Эти факторы включают в себя сумму будущих выбросов парниковых газов, разработки в области новых технологий, изменения в производстве энергии и видах землепользования, глобальные и региональные экономические условия, изменения народонаселения. Выводы Пятого доклада МГЭИК основаны на наборах сценариев, называемых репрезентативными траекториями концентрации (РТК) [94].

РТКа́ми называются репрезентативные траектории концентраций, потому что они были разработаны для представления возможных будущих выбросов и концентраций опубликованных сценариев. Они сосредоточиваются на концентрациях парниковых газов, которые приводят непосредственно к изменению климата, и включают в себя «путь» – траекторию концентрации парниковых газов, в течение долгого времени, достигая определенного радиационного воздействия на 2100 год. Они определяются приблизительной суммарной величиной радиационного воздействия в 2100 г. [94].

Существуют четыре сценария: *RCP8.5*, *RCP6*, *RCP4.5* и *RCP2.6*. Цифры в каждом РТК относятся к величине радиационного воздействия и к производимым парниковым газам к 2100 году. Например, в *RCP8.5* в 2100 году радиационное воздействие составляет $8,5 \text{ Вт/м}^2$. Радиационное воздействие – это мера энергии, поглощаемая и удерживаемая в нижних границах (слоях) атмосферы. Оно может быть положительным (потепление) или отрицательным (охлаждение), и зависит от концентрации парниковых газов, концентраций аэрозолей, изменения в землепользовании и природных факторов (например таких, как суммарная солнечная радиация). Каждый РТК определяет удельные выбросы траектории и последующего радиационного воздействия. Четыре РТКа охватывают ряд сценариев изменения выбросов (с учетом и без учета воздействия государственного управления) и уменьшения последствий изменения климата. Например, *RCP8.5* основана на минимальных попытках по сокращению выбросов; *RCP2.6* – на серьезных попытках, по снижению возможных негативных последствий [94].

Следует отмечать, что размерность осадков Пятого доклада – килограмм на квадратный метр в секунду ($\text{кг/м}^2/\text{с}$). Это значит 1 килограмм дождевой воды распространяется по 1 квадратному метру поверхности при толщине 1 миллиметр, следовательно, $1 \text{ кг/м}^2/\text{с}$ равно 86400 мм/сутки или 1 кг/м^2 – это 1 мм осадков.

Рисунок 1.8 иллюстрирует изменения температуры, площади морского льда и средней глобальной величины pH на поверхности океана, прогнозируемые по *RCP8.5* и *RCP2.6*. Жирные линии представляют средние значения, а вокруг них представлен широкий спектр результатов прогноза. Цифры указывают номер модели, используемой для генерации результатов.

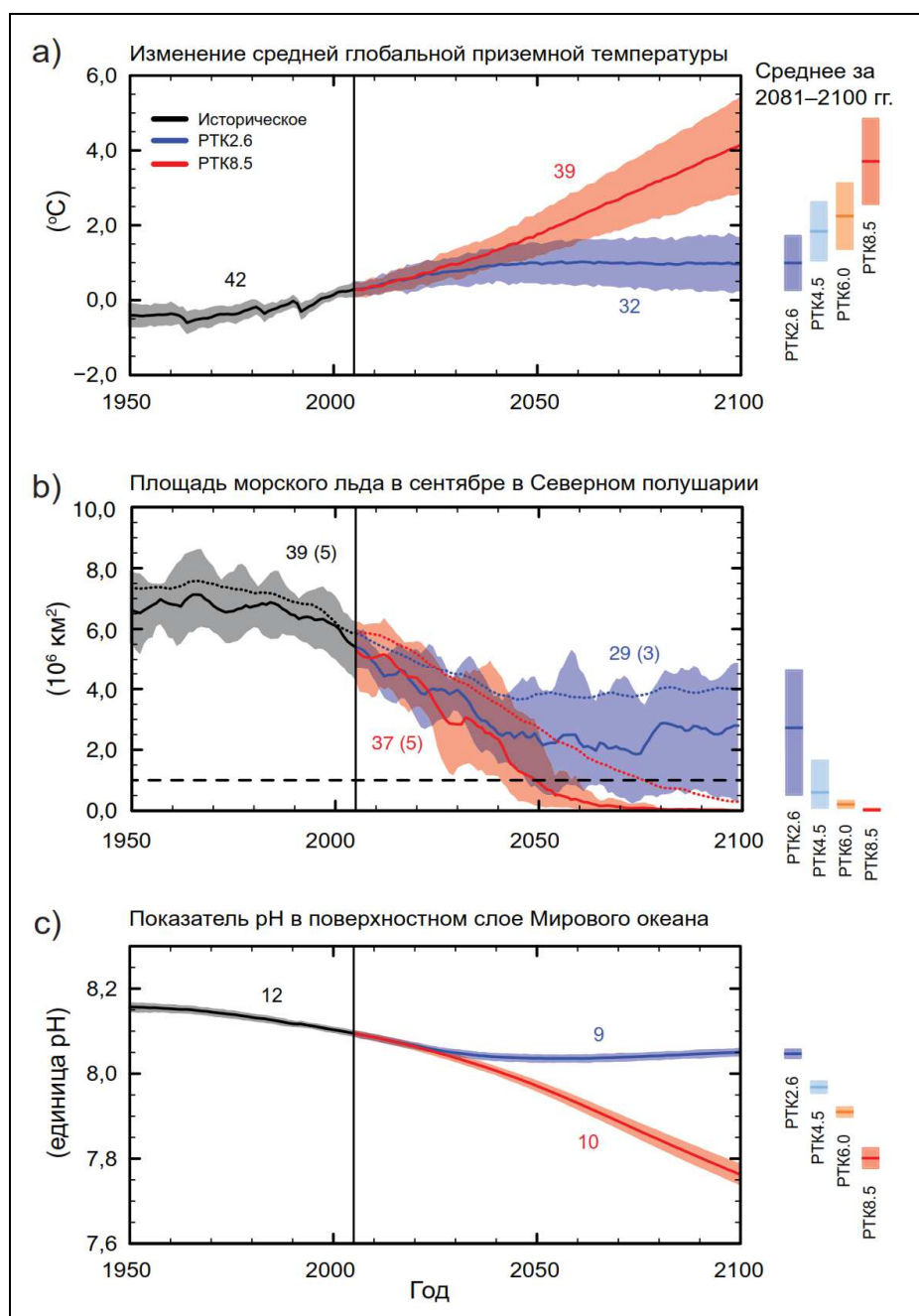


Рисунок 1.8 – Результаты расчетов по моделям ПССМ5 временных рядов с 1950 по 2100 гг. (a) изменений среднегодовой глобальной приземной температуры по сравнению с 1986 по 2005 гг., (b) площади морского льда в сентябре в Северном полушарии (5-летнее скользящее среднее) и (c) средней глобальной величины pH на поверхности океана [42].

1.4 Построение и обоснование карт характеристик годового стока и испарения бассейнов рек Ирана

Происходящие климатические изменения в настоящее время уже подтверждаются многолетними данными температурных наблюдений на всех континентах, во всех странах, включая Иран. При любых причинах (антропогенных или естественных) встает вопрос об оценке гидрологических последствий изменения климата. Для решения этого вопроса на начальном этапе необходимо статистически оценить современный режим многолетнего годового стока. Целью данной главы является создание информационной базы для последующей оценки текущего гидрологического режима и параметризации прогностических (сценарных) моделей вероятностных характеристик многолетнего годового стока рек Ирана – Сефидруд и Карун. Информационная база должна содержать карты расчетных гидрологических характеристик: нормы стока h , коэффициентов вариации C_v и асимметрии C_s , а также коэффициентов стока k и автокорреляции $r(1)$ при годовой сдвиге. Последние коэффициенты (k и $r(1)$) необходимы также для оценки степени устойчивости существующего многолетнего режима речного стока.

1.5 Гидрологические характеристики многолетнего годового стока рек Сефидруд и Карун

В качестве исследуемых речных бассейнов были взяты водосборы рек Сефидруд и Карун, которые располагаются на севере и юго-западе Ирана (см. рисунок 1.9).

В исследовании использованы данные наблюдений с гидрологических и климатических постов, полученные из Управления Водных Ресурсов Ирана (*Iran Water Resources Management Company*) и также отчеты компаний *BehanSad* и *Mahab Ghodss* [113, 114, 121, 122]. Эти данные включают в себя

расходы воды, суммы годовых осадков, среднегодовые температуры воздуха и карты бассейнов с гидрологической сетью.

Река Сефидруд впадает в Каспийское море и является крупнейшей (площадь водосбора около 56,2 тыс. км²) и самой многоводной рекой иранского побережья Каспия. Река Карун впадает в Персидский залив и является крупнейшей рекой Ирана (площадь водосбора около 67,3 тыс. км²). Средний годовой расход р. Сефидруд и Карун около 130 м³/с и 575 м³/с соответственно. Далее приведена краткая гидрометеорологическая информация по бассейнам рек Сефидруд и Карун.

Бассейн реки Карун

Водосбор реки Карун на 68 процентов является гористым и на 32 процента – равнинным. Качество питьевой воды в реке является удовлетворительным, что позволяет развиваться городской и сельскохозяйственной промышленности, однако ближе к Персидскому Заливу состав воды резко меняется.



Рисунок 1.9 – Местоположение речных бассейнов Сефидруд и Карун.

Годовая величина осадков варьируется от 153 миллиметров в южной части территории до более чем 2000 миллиметров на гористых частях бассейна, среднее значение годовых осадков по территории бассейна р. Карун составляет 632 миллиметра. Максимальное количество осадков в этом районе наблюдается в зимний период, а летом количество осадков резко сокращается. Распределение норм осадков по бассейну р. Карун показано на рисунке 1.10. Среднее значение годовых температур в этом бассейне 15,6 градусов по Цельсию. Температура варьируется от +26 °С в южных районах до –4 °С в горных районах.

Анализ наблюдений за относительной влажностью в бассейне Каруна позволяет утверждать, что годовая относительная влажность воздуха здесь меняется от 40 до 49 %. Максимальное значение относительной влажности на данной территории наблюдается в январе. В пределах бассейна Каруна наблюдается большие вариации климатических типов: из 32 категорий Домартина, здесь можно встретить 25 типов [113].

Бассейн реки Сефидруд

На территории бассейна р. Сефидруд среднее значение осадков варьируются от 250 до 1650 мм. Максимальное значение осадков наблюдается на северо-западе района и на побережье Каспийского моря. На побережье Каспийского моря величина осадков может достигать более 1700 мм. Распределение норм осадков показано на рисунке 1.11.

Среднее значение годовой температуры воздуха колеблется от +3 до +18 градусов по Цельсию. В этом районе климат меняется от семиаридного до средиземноморского, а климат прибрежных районов Каспийского моря является умеренным и влажным [114].

Расположение гидрологических постов в бассейнах Сефидруд и Карун представлено на рисунке 1.12. Они расположены равномерно по территории, из них были выбраны посты с незарегулированным стоком для надежной статической обработки рядов и картирования ее результатов.

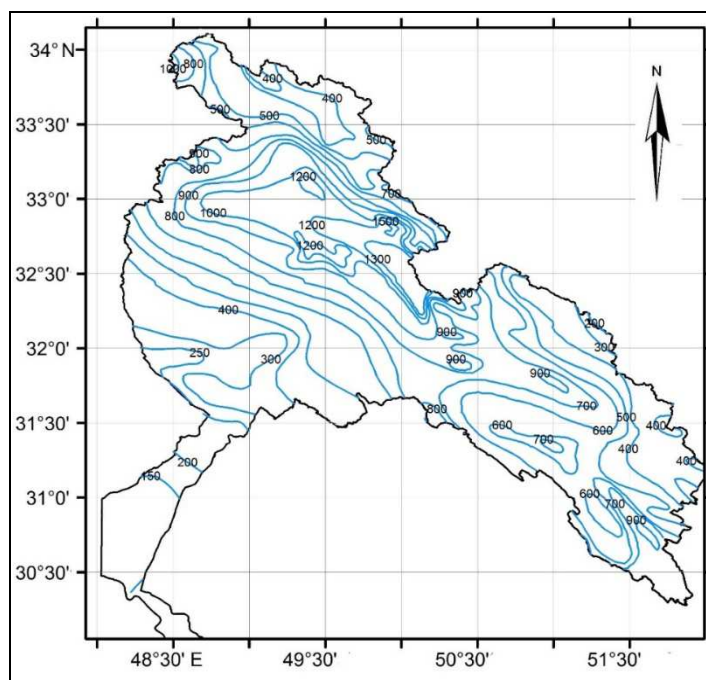


Рисунок 1.10 – Среднее значение годовых осадков по территории Каруна.

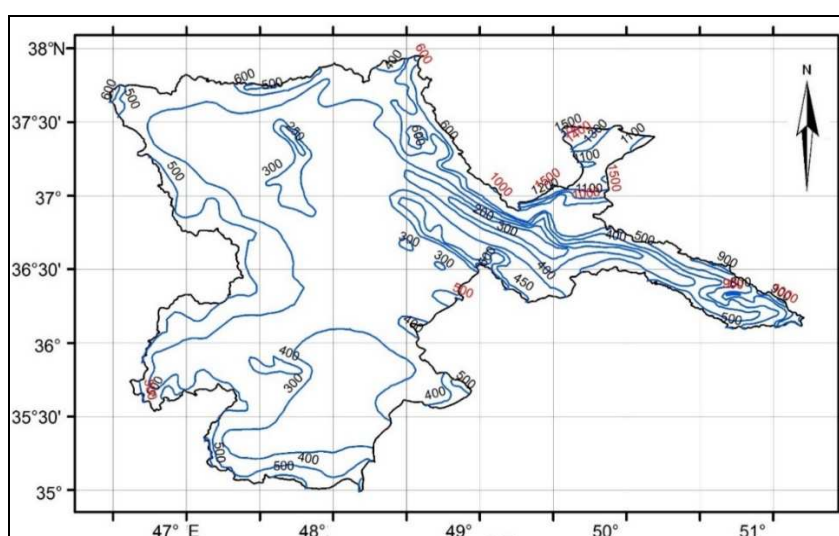
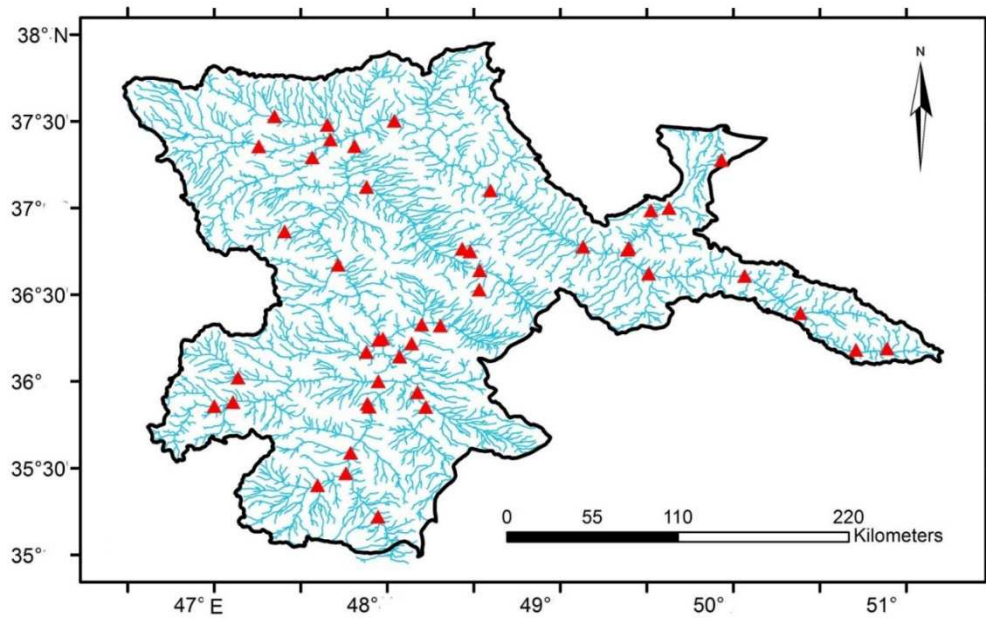


Рисунок 1.11 – Среднее значение годовых осадков по водосбору р. Сефидруд.

Всего получилось 56 постов: по 28 постов в каждом рассматриваемом бассейне. Обработка рядов проводилась полностью в соответствии с теми рекомендациями, которые используются в России [45]: построение разностно-интегральных кривых, применение критериев Стьюдента и Фишера для оценки степени однородности. Статистически

a)



б)

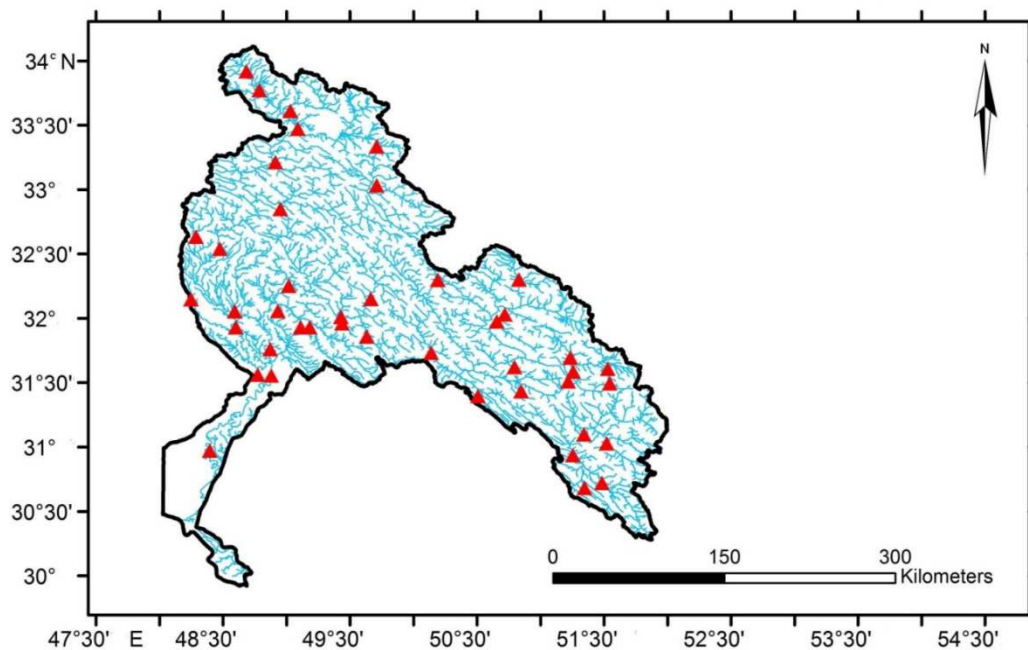


Рисунок 1.12 – Расположение гидрологических постов в речных бассейнах Сефидруд (а) и Карун (б).

обрабатывались только ряды наблюдения за расходом воды зональных рек. Для определения критической площади, отделяющей азональные бассейны от зональных, была построена редукционная кривая показанная на рисунке 1.13, позволившая найти репрезентативную площадь равную 1700 км².

Речной сток в первую очередь зависит от климатических факторов. Реки, водный режим которых отражает все наиболее типичные черты многолетних колебаний стока, свойственные данной географической зоне, называются реками с зональным режимом стока.

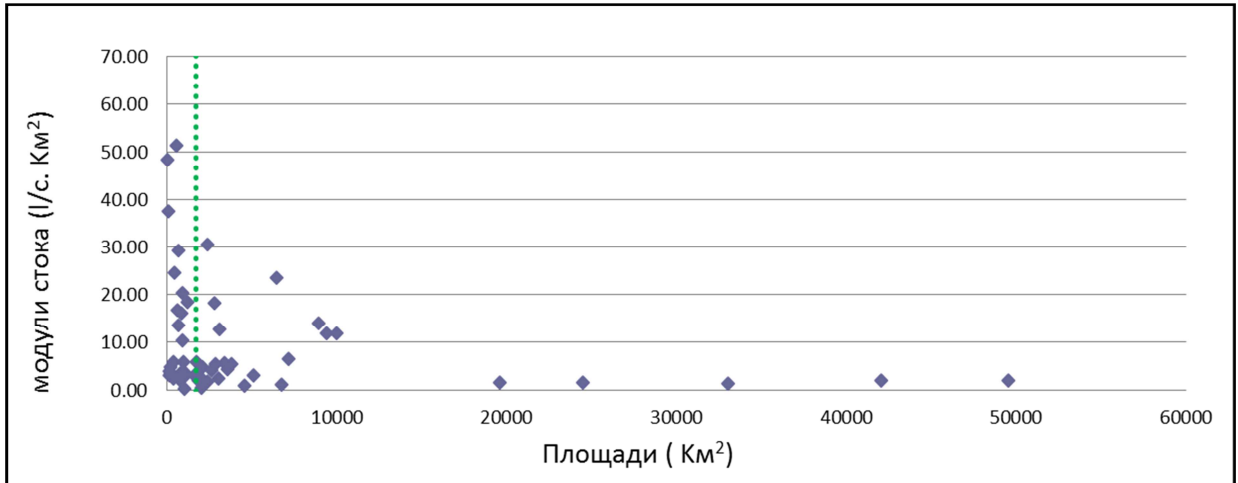


Рисунок 1.13 – Редукционная зависимость для бассейнов рек Сефидруд и Карун.

Реки, водный режим которых заметно отличается от зонального вследствие влияния местных факторов или особенностей (наличие озер, болот, карста и пр.), и его характер оказывается не типичным для рек данной географической зоны, называются реками с аazonальным режимом стока. Если водный режим рек формируется под влиянием особенностей двух и более географических зон и имеет сложный характер, то такие реки называются реками с полигональным режимом стока. Он обычно наблюдается на больших реках [10].

Водосборы, входящие в категорию зональных, могут адекватно реагировать на внешние воздействия (перестают проявляться аazonальные факторы формирования стока) [34].

Реки зонального типа должны быть использованы для оценки климатического воздействия на сток. Влияние индивидуальных свойств различных водосборов не имеет существенного значения в этих реках. Зональные

типы стока в основном отражают устойчивые долгосрочные связи между значениями стока и климатическими характеристиками, как осадки, температура воздуха и испарение [79].

В бассейнах р. Сефидруд и Карун было выбрано 56 гидрологических постов (за период с 1967 по 2006 для р. Карун, и с 1958 по 2006 гг. для р. Сефируд), замыкающих водосборы, находящиеся в естественных условиях, без влияния антропогенной деятельности. После проверки рядов на однородность по критериям Фишера и Стьюдента осталось 28 бассейнов.

Расположение гидрологических постов в бассейнах р. Сефидруд и Карун, удовлетворяющих условию зональности, показано на рисунках 1.14 и 1.15.

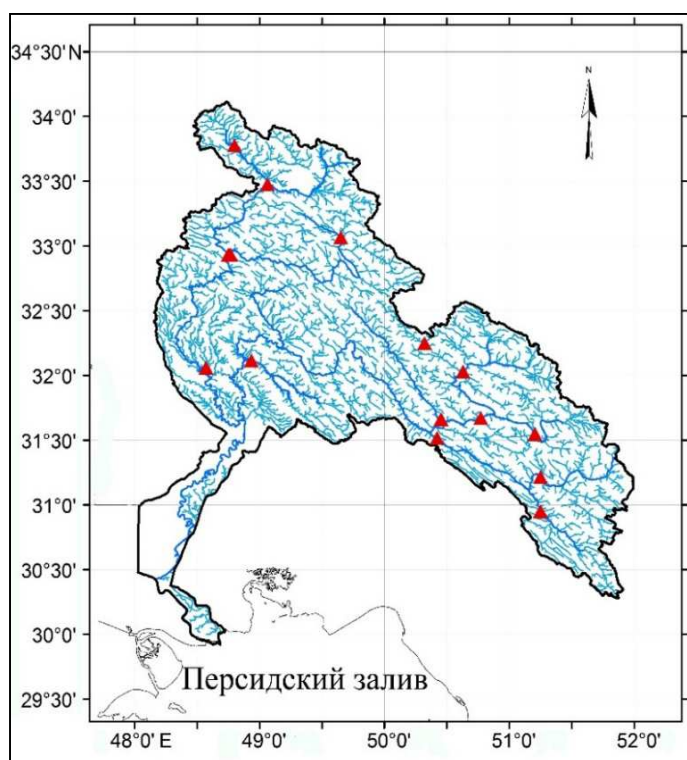


Рисунок 1.14 – Выбранные гидрологические посты за речным стоком в бассейне р. Карун.

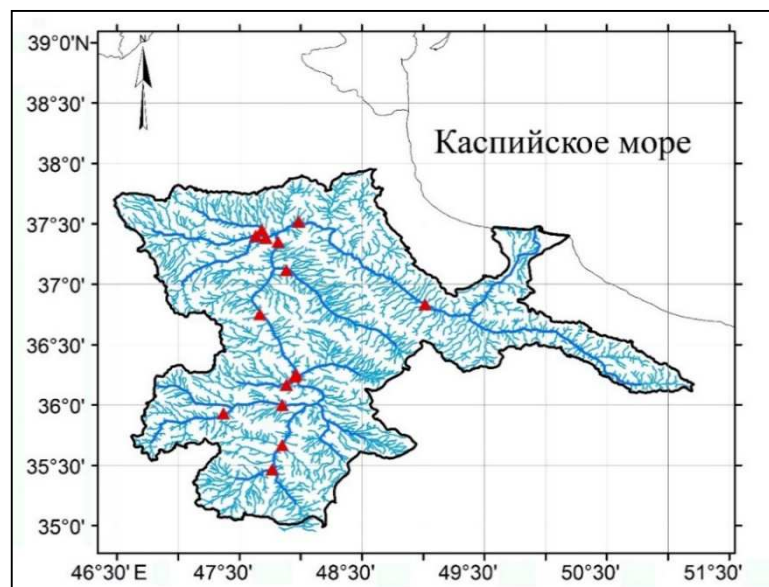


Рисунок 1.15 – Выбранные гидрологические посты за речным стоком в бассейне р. Сефидруд.

Ряды расходов воды бассейнов, площадь которых больше 1700 км², были проверены на однородность по критериям Стьюдента (t) и Фишера (F) (при 5 % уровне значимости). Результаты проверки показаны в таблице 1.1.

Разностно-интегральные кривые

В рядах годового стока рек наблюдается чередование групп маловодных и многоводных лет, что приводит к образованию так называемых циклов водности. Один цикл водности включает в себя маловодную и многоводную фазы. Наиболее наглядное представление о циклах колебаний годового стока дает разностно-интегральная кривая (РИК), которая представляет собой график зависимости [9, 14]:

$$f(t) = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)}{C_v}, \quad (1.1)$$

где, K_i – модульный коэффициент, который находится как соотношение

Таблица 1.1 – Гидрометеорологические характеристики водосборов рек Карун и Сефидруд и результаты проверки рядов на однородность

Пост	Площадь, км ²	Осадки (X) мм	Q, м ³ /с	Результаты теста <i>F</i>	Результаты теста <i>t</i>
Бассейн р. Карун					
<i>Patave</i>	2800	751	51	+	+
<i>Kata</i>	3638	617	38,8	+	+
<i>Barez</i>	8953	633	126	+	+
<i>Kohe Sokhte</i>	2831	558	7,31	+	+
<i>Rahim Abad</i>	1729	471	5,93	+	+
<i>Dorud</i>	3400	522	19,36	–	+
<i>Solegan</i>	1992	654	10,3	+	+
<i>Pole</i>	2821	625	15,8	+	+
<i>Morghak</i>	2967	893	71,9	+	+
<i>Armand</i>	9986	595	119	+	+
<i>Sepid dast</i>	7174	575	47,7	–	+
<i>Tange Panj</i>	9410	645	112	–	+
<i>Behsht Abad</i>	3820	420	20,9	+	+
<i>Dashte</i>	2616	277	10,9	+	+
<i>Tange Panj</i>	6432	977	152	+	+
Бассейн р. Сефидруд					
<i>Bianlood</i>	5078	235	16,2	+	+
<i>Salamat Abad</i>	6770	262	8,1	+	+
<i>Hashtad Joft</i>	1825	230	3,94	δ1≠δ2	+
<i>Gragoni- Ghezelozon</i>	19618	342	32,8	+	+
<i>Iyanki Kand</i>	2370	285	4,39	+	+
<i>Sarcham</i>	4536	252	4,49	+	+
<i>Pole Dokhtar</i>	33021	260	51,3	+	+
<i>Moter Khane</i>	1802	267	5,38	+	+
<i>Ostor</i>	42081	311	84,3	–	+
<i>Gilave</i>	49578	337	105	+	+
<i>Myane</i>	2146	310	5,91	+	+
<i>Myane-</i>	3542	296	15,4	+	+
<i>Mahneshan-</i>	24511	324	41,4	+	+
<i>Nesar Oliya</i>	1569	351	10,3	+	+
<i>Shadi Abad-</i>	1935	330	1,14	+	+

расхода воды за каждый год к среднему значению расходов воды $K_i = Q_i / \bar{Q}$;

C_v – коэффициент вариации.

Были построены разностно-интегральные кривые, для примера одна из них представлена на рисунке 1.16, остальные приводятся в Приложении А.

Получено, что многоводная фаза длилась в среднем от 1985 до 1995 года, для Каруна, и от 1966 до 1997 года, для Сефидруда. В годы до и после этих периодов имела место маловодная фаза.

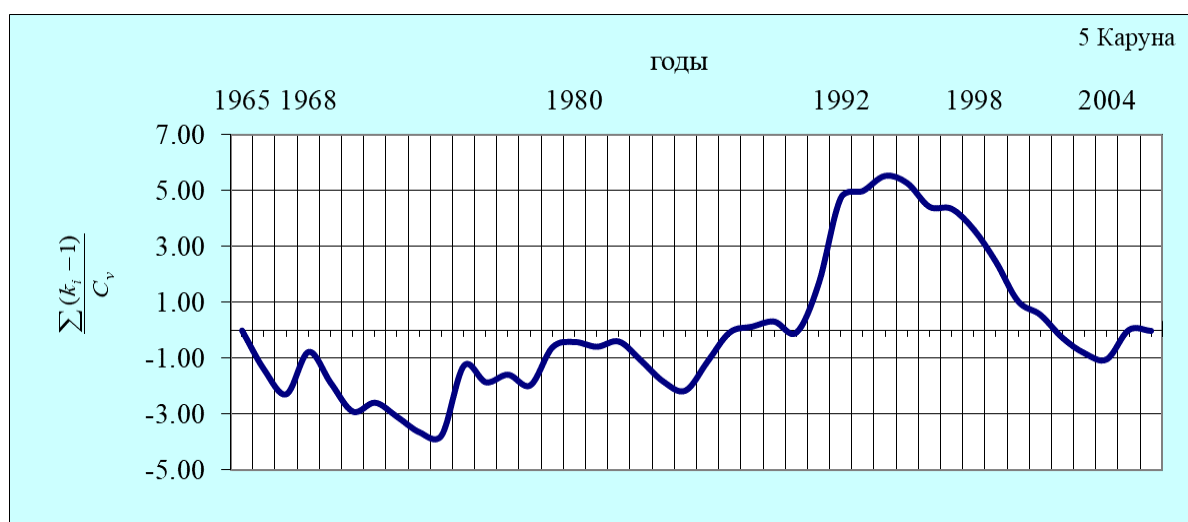


Рисунок 1.16 – Разностно-интегральная кривая *Kohe Sokhte* р. Карун.

Статистическая оценка гидрологических характеристик

Статистические характеристики речного стока вычислялись по общеизвестным формулам, которые можно найти во всех учебниках по гидрологическим расчетам (см., например, [57, 58]). Вычисление производилось по следующим формулам.

– Среднегодовой расход воды и его среднеквадратическое отклонение:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad \sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n}}, \quad (1.2)$$

где, Q_i – расход воды за i -й год;

n – число членов ряда расходов воды (продолжительность ряда).

– Коэффициент вариации и его среднеквадратическое отклонение:

Коэффициент вариации – это безразмерный показатель, равный отношению стандартного отклонения к среднему значению. Этот коэффициент определяет степень изменчивости переменных по отношению к среднему значению в данном ряду [104].

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{\bar{Q}} - 1 \right)^2}{n}}, \quad \sigma_{C_v} = C_v \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}}. \quad (1.3)$$

– Коэффициент асимметрии и его среднеквадратическое отклонение:

Коэффициент асимметрии является безразмерным параметром, характеризующим асимметрию распределения данной случайной величины, и также степень асимметричности рассеяния относительно математического ожидания. Значение коэффициента асимметрии может быть положительным или отрицательным [118].

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{\bar{Q}} - 1 \right)^3}{n * C_v^3}, \quad \sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{n} \left(1 + 6 * C_v^2 + 5 * C_v^4 \right)}. \quad (1.4)$$

– Коэффициент автокорреляции:

Автокорреляция случайного процесса характеризует

корреляционную связь между значениями процесса в различные моменты времени. Это значит, для каждого интервала времени определяется степень корреляции между соседними значениями [109].

$$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_{i+1} - \bar{Q}_1) * (Q_i - \bar{Q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=2}^n (Q_{i+1} - \bar{Q}_1)^2 * \sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - \bar{Q}_2)^2}} . \quad (1.5)$$

– Слой годового стока в миллиметрах [17].

$$Y = \frac{\bar{Q}}{F} \cdot 31,54 \cdot 10^3, \quad (1.6)$$

где, F – площадь водосбора.

– Коэффициент стока:

$$k = \frac{Y}{X}, \quad (1.7)$$

где, X – норма осадков.

Представление о рассчитанных статистических характеристиках дает таблица А.1 Приложения А. Продолжительность рядов составляет в среднем 40 лет, большинство рядов начинаются с 1968 года, только 6 рядов – с 1967 года, и заканчиваются все ряды 2007 годом.

По данным расчетов, представленных в таблице, построены карты, которые показаны на рисунке А.6.

На рисунке А.6, a и d , наибольшая величина слоя стока в бассейне Сефидруд составляет около 500 мм/год и наблюдается на востоке, в бассейне Карун – 600 мм/год на западе. Большие значения слоя стока связаны с большим количеством осадков, выпадающим в этих районах. Средняя

погрешность нормы слоя стока составляет 7 %, максимальное значение погрешности – 10 %.

Из рисунка А.6, *б* и *е* видно, что изменение коэффициента вариации C_v незначительное, в бассейне Сефидруд большие величины C_v находятся на востоке, а в бассейне Карун различие в величинах C_v не существенны. Распределение значений коэффициентов вариации связано с распределением слоя стока: относительно большие значения C_v соответствуют малым значениям стока и наоборот. Сток, например, небольшой реки более изменчив от года к году и, соответственно, при расчете коэффициента вариации, как частного от деления среднеквадратического отклонения на норму стока, получается большее значение. Средняя погрешность коэффициента вариации для рассматриваемых водосборов составляет 13 % (с учетом продолжительности рядов равной 40 годам и малоизменяющихся значений коэффициентов вариации).

Коэффициент асимметрии C_s в рассматриваемых бассейнах увеличивается с запада на восток. Следует отметить, что при сорокалетней продолжительности рядов, значения коэффициентов асимметрии могут содержать значительные погрешности, достигающие 36 %.

Модуль стока – количество воды, стекающее в единицу времени с единицы площади бассейна. Чаще всего модуль стока выражается в литрах в секунду с километра квадратного [17]. Большие значения модуля стока в бассейне Сефидруд находятся на востоке, а в Каруне – на западе. Что соответствует распределению осадков.

Автокорреляционные функции

Коэффициент автокорреляции показывает взаимосвязь между значениями какой-либо величины из временного ряда и ее предыдущими или последующими значениями. Если высокие значения следуют за высокими значениями или низкие значения за низкими значениями, то это показатель сильной автокорреляции во временном ряду. График коэффициентов авто-

корреляции, как функции от временной сдвигки (лагу), называется коррелограммой или автокорреляционной функцией [109].

В практике гидрологических расчетов учитывается внутрирядная связность смежных членов ряда гидрологических характеристик, которая и определяется коэффициентом автокорреляции $r(1)$. Коэффициент автокорреляции зависит от среднего многолетнего стока и от его изменчивости [43]. Отмечено, что для зоны избыточного и достаточного увлажнения характерна обратная зависимость коэффициента от среднего многолетнего стока. В зоне недостаточного увлажнения с увеличением водности увеличивается и коэффициент автокорреляции [126].

Выяснилось [22], что коэффициент автокорреляции существенным образом влияет на устойчивость самого процесса формирования многолетнего речного стока. Под словами «неустойчивость формирования многолетнего стока» имеется в виду неустойчивость решения стохастической модели, описывающей эволюцию четырех начальных статистических моментов, необходимых для задания семейства кривых К. Пирсона [22].

Для простых марковских случайных процессов автокорреляционная функция $r(\Delta t)$ имеет вид:

$$r = \exp[-(\bar{c} - 0,5 G_{\tilde{c}}) \Delta t] \quad (1.8)$$

где, Δt – временная сдвигка;

$G_{\tilde{c}}$ – интенсивность белого статистического шума показателя обратного коэффициенту стоку $\bar{c}$.

Именно из функции (1.8) был получен критерий β [22].

На рисунках 1.17 и А.7 – А.11 представлены автокорреляционные функции бассейнов р. Карун и Сефидруд, а в таблице А.1 значения коэффициентов автокорреляции r при сдвигке $\Delta t = 1$. Из рисунков видны изменения коэффициента автокорреляции r при разных сдвигках Δt .

Критерий устойчивости β

Задание плотности вероятности $p(Q)$ равносильно заданию определенного числа статистических начальных моментов: $p(Q) \sim m_1, m_2, m_3, \dots$ Известна процедура, позволяющая аппроксимировать уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) системой уравнений для моментов (система приведена не вся, а только та часть, которая позволяет оценить устойчивость ее решений):

$$dm_n / dt = -(\bar{c} - 0,5nG_{\tilde{c}})m_n + \dots \quad (n = 1, 2, 3\ldots) \quad (1.9)$$

Из системы (1.9) видно, что при $c < 0,5nG_{\tilde{c}}$ (здесь n – порядок начального момента) производная $dm_n / dt > 0$, т. е. $m_n \rightarrow \infty$. Это и есть формальный признак неустойчивости [31].

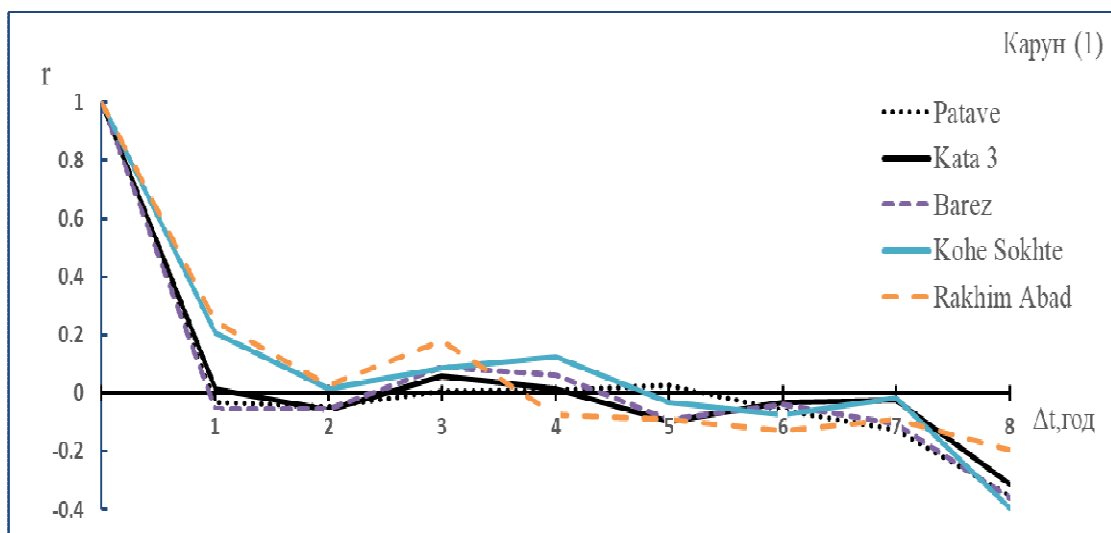


Рисунок 1.17 – Автокорреляционная функция (коррелограм) *Patave, Kata, Barez, Kohe Sokhte Rahim Abad* р. Карун

Для нахождения критерия неустойчивости β необходимо определение численного значения интенсивности бассейнового шума $G_{\tilde{c}}$ [31], но это может вызвать ряд затруднений. Однако практическую формулу для

вычисления β можно найти, опираясь на тот факт, что автокорреляционная функция(r) для марковских случайных процессов (частное решение уравнения ФПК [31]) представляет собой экспоненту $r = \exp[-(\bar{C} - 0,5 G_{\bar{C}})\Delta t]$ (здесь $\bar{C} = 1/k\tau$, где τ – время релаксации речного бассейна, равное 1 году при рассмотрении многолетнего годового стока). При годовой сдвиге ($\Delta t = 1$) эта формула сводится к выражению для вычисления критерия устойчивости:

$$\beta = 2k\ln(r) + 2, \quad (1.10)$$

где, r – коэффициент автокорреляции.

При увеличении значения β выбрасываются из рассмотрения ряд сложных понятий (экссесс, асимметрия, и т. д.), а при уменьшении, наоборот, вводят их в рассмотрение.

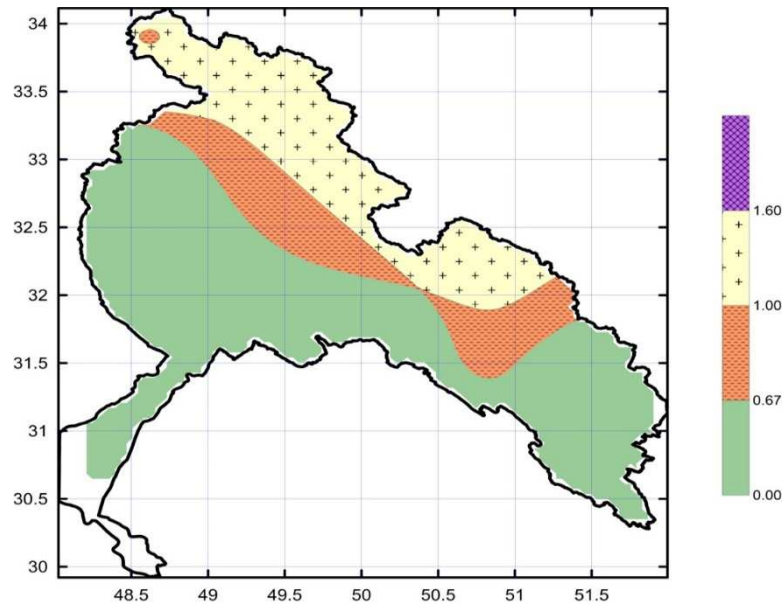
При $\beta > 0,67$ происходит потеря устойчивости третьим моментом, при $\beta > 1$ – вторым. Отсутствие устойчивости по начальным моментам говорит о том, что ряды расходов не представляют собой устойчивой статистической совокупности в классе распределений К. Пирсона [31].

На рисунке 1.18 показано распределение критерия устойчивости по территории. Из рисунка 1.18 видно, что на значительной территории бассейна Сефидруда годовой сток формируется неустойчиво по третьему и второму начальным моментам (а значит, по коэффициентам асимметрии и вариации), но в бассейне р. Карун видно, что больше половины территории устойчиво по второму начальному моменту.

В выявленных зонах неустойчивости решений модели для моментов вероятностных распределений, процесс формирования речного стока необходимо описывать совместно с процессом формирования испарения с поверхности суши, которое является важным элементом водного баланса речных бассейнов Ирана. При использовании только статистических ха-

рактестик стока могут возникнуть проблемы и с правильной аппроксимацией эмпирических распределений стока кривыми из класса семейств распределений Пирсона; ситуация может ухудшиться при

a)



б)

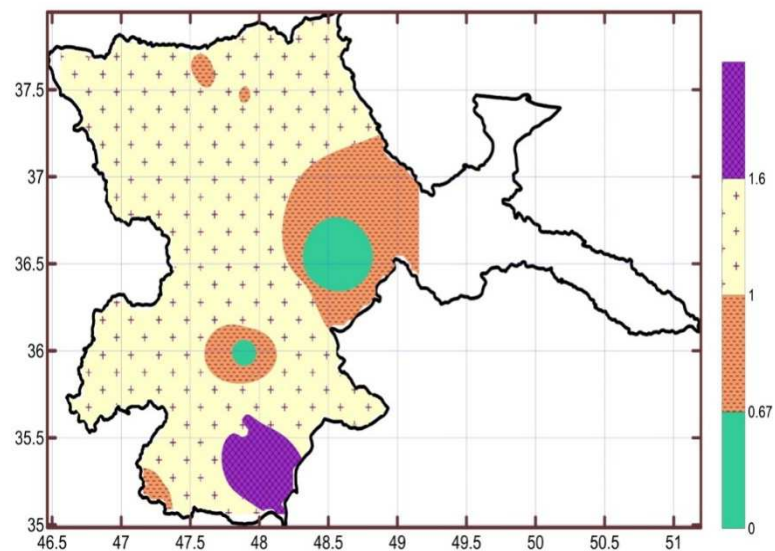


Рисунок 1.18– Распределение критерия устойчивости β по Каруну (*a*) и Сефидруд (*б*).

прогнозной оценке гидрологического режима по определенным климатическим сценариям. Таким образом, по созданной информационной базе рассчитаны и оценены статистические характеристики стока рек Сефидруд

и Карун с целью дальнейшего выполнения сценарных прогнозов при изменяющемся климате. Однако при долгосрочном прогнозировании следует учитывать то обстоятельство, что описание процесса формирования стока оказалось неустойчивым по второму и третьему моментам в некоторых районах рассматриваемых речных бассейнов. В таких речных бассейнах следует применять методологию частично инфинитного моделирования [30], которая начинается с фрактальной диагностики рядов речного стока, т. е. с определения числа переменных в прогностической модели (см., например, [12]).

Построение кривых обеспеченности

Кривая обеспеченности – это интегральная кривая, которая показывает вероятность превышения (в процентах или долях от единицы) гидрологической характеристики среди общей совокупности ряда. Например, обеспеченность водности года иногда характеризуются ее средней повторяемостью. Для многоводных лет повторяемость показывает, как часто встречаются в среднем годы данной или большей водности, для маловодных – данной или меньшей водности.

В практике гидрологических расчетов различают два типа кривых обеспеченности: эмпирические (наблюдаемые) и теоретические (аналитические) кривые. Понятия, характеризующие кривые обеспеченности, следующие.

– Частота показывает, во скольких случаях за рассматриваемый период времени величина гидрологического параметра находилась в определенном интервале.

– Обеспеченность показывает, во скольких случаях величина гидрологического элемента имела значения, равные и большие определенной величины. В широком понимании обеспеченность – это вероятность превышения данной величины.

Частота и обеспеченность могут выражаться числом случаев, но в гидрологических расчетах их чаще всего определяют в процентах от общего числа членов гидрологического ряда. Графически изменения обеспеченности изображаются кривыми обеспеченности.

Из этой кривой видно, что чем больше величина гидрологического параметра, тем меньше процент обеспеченности, и наоборот [116].

Обоснованный расчет эмпирической кривой обеспеченности можно выполнить только при числе наблюдений за стоком реки более 30–40 лет [125].

Обеспеченность рассчитывается по формуле:

$$P = 100 m/n, \quad (1.11)$$

где, n – число членов убывающего ряда;

m – порядковый номер члена ряда.

Порядок построения эмпирической кривой обеспеченности:

- а) все члены гидрологического ряда записываются в убывающем по абсолютной величине порядке;
- б) каждому члену ряда присваивается порядковый номер, начиная с единицы;
- в) определяется обеспеченность каждого члена убывающего ряда по формуле 1.11.

Эмпирическая кривая строится по ряду наблюдений, поэтому для определения значений редкой обеспеченности строятся аналитические кривые на основе данных фактического ряда. Аналитические кривые обеспеченности применяются для сглаживания и экстраполяции эмпирических точек. В настоящее время за основу приняты биномиальная кривая обеспеченности и кривая трехпараметрического гамма-распределения [28]. Трехпараметрическое гамма-распределение является более гибким, чем биномиальное.

Аналитическую кривую обеспеченности при известных параметрах нормы стока, коэффициентов вариации и асимметрии строят с помощью таблиц, в которых представлены результаты интегрирования соответствующих кривых распределения [55, 50].

Ординаты аналитических кривых обеспеченности определяют следующим образом:

а) выбирают таблицу, соответствующую определенному коэффициенту асимметрии C_s .

б) по выбранной таблице для заданного коэффициента асимметрии C_s выписывают значения t_p при различных значениях Q_p (от 0,001 до 99,9%). Если заданный коэффициент асимметрии C_s не совпадает с табличным, то проводят интерполирование.

в) определяют абсолютные ординаты кривой обеспеченности:

$$Q_p = t_p Q_0 + \delta. \quad (1.12)$$

По вычисленным ординатам аналитической кривой обеспеченности, строится график трехпараметрического гамма распределения.

Одним из примеров использования аналитической кривой обеспеченности является оценка влияния изменения климата. Если аналитическая кривая обеспеченности уходит в отрицательную область, то река реагирует на изменения климата (вероятность пересыхания реки) [25].

Для выявления вероятности пересыхания рассматриваемых рек были построены кривые обеспеченности Пирсона III типа. Используемая кривая Пирсона при больших обеспеченностях может уходить в отрицательную область, что интерпретируется как вероятность пересыхания реки (как реакция на засушливый период). Для изучения влияния климатических характеристик было построено 30 кривых обеспеченностей для бассейна р. Сефидруд и Карун. Из тридцати построенных кривых обеспеченности у семи кривая в области низких расходов воды уходит в отрицательную об-

ласть (станции: *Bianlud*, *Sarcham-ZanjanRud*, *PoleDokhtar*, *MoterKhane*, *Myane – shahre Chai*, *Myane-Granko* – на территории Сефидруда, и станция *Patave* на территории Каруна). Можно сказать, что отрицательную часть площади можно интерпретировать как вероятность пересыхания реки. Также и, формально для кривых Пирсона III типа это происходит в ситуации, когда $C_s < 2C_v$, т. е. интенсивность G_N небольшая [25]. Некоторые кривые (уходящие в отрицательную область) представлены на рисунках 1.19 и A.12 – A.14.

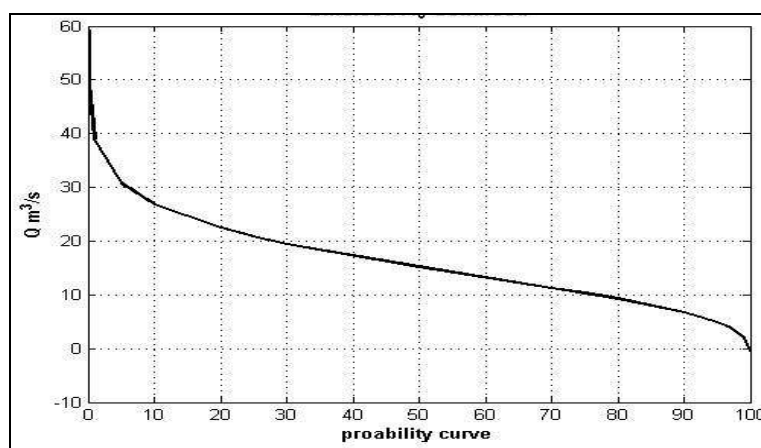


Рисунок 1.19 – Кривая обеспеченности, станция *Binalud*.

1.6 Годовое испарение с водосборов рек Сефидруд и Карун

Одним из элементов водного баланса является испарение, которое оказывает существенное влияние на баланс водосборов. Существует много методов расчета испарения, которые применяются в России и в Иране. В главе будут рассмотрены эти методы, сделаны по ним расчеты значений испарения и оценены результаты.

Методы расчета испарения

Существуют различные методы для оценки значения испарения, в том числе эмпирические формулы. Далее будут приведены методы, которые распространены в Иране и в России.

1) Метод Тюрка [77]:

$$E = P / [0.9 + (P / l)^2]^{0.5}, \quad (1.13)$$

$$l = 300 + 25T + 0.03T^3, \quad (1.14)$$

где, E – ежегодное испарение, мм/год;

l – испаряемость, мм/год;

P – осадки, мм/год;

T – средняя температура воздуха, °C.

2) Метод *Thornthwaite* [77]:

$$PET = 16(10t_m / l)^a, \quad (1.15)$$

$$t_m = (T_m / 5)^{1.57}, \quad (1.16)$$

$$a = (6.75 \cdot 10^{-7})l^3 - (7.71 \cdot 10^{-5})l^2 + (1.792 \cdot 10^{-2})l + 0.492, \quad (1.17)$$

где, PET – значение месячной эвапотранспирации;

t_m – ежемесячный индекс *Thornthwaite*;

a – коэффициент.

3) Метод *Munson* [76]:

$$\log(P / E) = \log(115) + 10/9 \log(P) - 10/9 \log(T - 10), \quad (1.18)$$

где, T – среднемесячная температура, °F;

P – месячное количество осадков, дюйм;

E – среднемесячное испарение, дюйм.

4) Метод *Hargreaves* [116]:

$$ET_0 = 0.0023R_s (T + 17.8) \sqrt{TR}, \quad (1.19)$$

$$TR = T_{\max} - T_{\min}, \quad (1.20)$$

где, E – испаряемость, мм;

T_0 – средняя температура воздуха, °C;

R_s – средние осадки, мм;

$T_{\max}$ – максимальная температура за рассматриваемый период, °C;

$T_{\min}$ – минимальная температура за период, °C.

5) Метод *United States Bureau of Reclamation (USBR)* [77]:

$$E = 0.833(4.57T + 43.3), \quad (1.21)$$

где, E – месячное испарение, мм;

T – среднемесячная температура воздуха, °C.

6) Метод Шрайбера [17]:

$$E = P(1 - e^{-E_0 / P}), \quad (1.22)$$

где, E – испарение, мм;

E_0 – испаряемость, мм;

P – осадки, мм.

7) Метод Ольдекопа [17]:

$$E = E_0 \operatorname{th}(E_0/P), \quad (1.23)$$

где, E – испарение, мм;

E_0 – испаряемость, мм;

P – осадки, мм.

8) Метод Н. А. Багрова и Тюрка [28]:

$$E = \bar{X} \cdot th(E_0 / \bar{X}), \quad (1.24)$$

$$E_0 = 300 + 25T + 0.05T^3, \quad (1.25)$$

где, E_0 – испаряемость, мм;

$\bar{X}$ – норма осадков, мм;

$\bar{T}$ – среднегодовое значение температуры воздуха, °С.

Перечисленные методы отличаются набором входящих величин. Например, метод под номером 2 включает в расчетные формулы элементы, которые не измеряются на стандартных метеорологических станциях и требуют дополнительных расчетов.

Практически все методы в своей основе содержат уравнение водного баланса, которое не включает изменение суммарных влагозапасов [11], например, методы под номерами 1, 3, 4, 6, 7, 8. Испарение, полученное по этим методам, будет содержать не учитываемую величину.

Испарение можно найти непосредственно из уравнения водного баланса для замкнутых речных водосборов, которое записывается в виде выражения для коэффициента стока:

$$k_{CT} = Q / \bar{X} = 1 - E / \bar{X}, \quad (1.26)$$

Данное выражение подразумевает использование норм стока, осадков и испарения. Но если принять величину годового изменения суммарных влагозапасов близкой к нулю (как на Иранском плоскогорье), то возможно использование формулы (2.26) для годового разрешения.

Результаты расчета испарения

Использование перечисленных выше методов, позволило определить значения испарения для 28 подбассейнов (см. рисунки Приложения Б). В некоторых случаях определенные по формулам значения испарения могут вызвать сомнения, например для поста *Octor* бассейна р. Сефидруд представлен в таблице 1.2.

В таблице 1.3 представлены значения испарения, полученные по формуле (1), – первый способ. Коэффициент испарения соответствует формуле $k_{\text{исп.}} = 1 - k_{\text{ст.}}$. Также рассчитаны коэффициенты детерминации линейной аппроксимации зависимости стока от осадков; получено, что коэффициент выше 0,7, показывающий хорошую связь гидрометеорологических характеристик. Сгенерированные ряды испарения оценены на однородность по дисперсии и среднему значению; по среднему значению все ряды однородны на 5 % уровне значимости. Рассчитанные величины испарения закартированы, см. рисунок А.15, а, в.

Результаты второго способа представлены в таблице 1.4. Данный способ отличается от первого тем, что для каждого поста коэффициенты испарения и стока были найдены по нормам осадков и стока, по этим коэффициентам и годовым осадкам были определены значения испарения на каждый год. Значения коэффициента испарения мало отличаются, следовательно, и значения испарения также мало отличаются.

Таким образом, в ходе выполнения данного исследования были получены следующие результаты:

- а) предложены косвенные методы расчета испарения;
- б) все сгенерированные ряды однородны по критерию Стьюдента;
- в) разница между двумя предложенными методами незначительна, например, для поста *Bianlod*, по первому способу испарение равно 307, а по второму равно 312 мм за год;
- г) режим и величина осадков являются определяющими факторами при расчете стока и испарения.

Таблица 1.2 – Расчет испарения (мм)

Годы	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Значения гидрометеорологических характеристик											
$T_{\min}$ ($^{\circ}C$)	4,7	5,3	6,1	7	6,1	5,7	6,8	8,9	8,5	9,3	8,4
$T_{\max}$ ($^{\circ}C$)	19,3	21,1	20,7	22,7	22,5	22,7	22	23,8	22,1	22,4	21,8
$T_{\text{средняя}}$ ($^{\circ}C$)	12	13,2	13,4	14,9	14,3	14,2	14,4	16,4	15,3	15,8	15,1
Осадки, мм	425	372	448	604	334	263	395	191	220	243	236
Значения испарения, полученные по различным формулам											
Формула Тюрка	375	347	400	507	323	262	370	197	224	246	239
Формула USBR	982	1034	1045	1112	1087	1082	1092	1180	1134	1156	1124
Формула Munson	323	295	358	462	281	203	305	167	182	204	192
Формулы Багрова и Тюрка	410	366	428	549	331	262	389	191	220	242	235
Формулы Hargreaves и Шрайбера*	406	361	427	544	329	262	385	191	220	242	235
Формулы Hargreaves и Ольдекопа*	211	205	219	221	209	193	225	168	175	182	175
Формулы Thornthwaite и Шрайбера*	312	294	325	389	281	238	321	186	210	228	220
Формулы Thornthwaite и Ольдекопа*	53	73	50	10	88	99	90	108	107	109	104
Примечание: * – при расчете значения испарения было использовано две формулы, например, испаряемость находится по формуле Hargreaves, а дальше значение испарения вычисляется по формуле Шрайбера.											

Таблица 1.3 – Результаты по первому способу

Пост	N	R^2	$k_{ст.}$	$k_{исп}$	C_v	C_s	Однородность по Фишеру	Однородность по Стьюденту	E , мм
Бассейн р. Карун									
<i>Patave</i>	40	0,84	0,69	0,31	0,38	0,14	+	+	245
<i>Kata</i>	34	0,85	0,71	0,29	0,39	0,28	+	+	131
<i>Barez</i>	36	0,87	0,75	0,25	0,41	1,08	–	+	135
<i>Kohe Sokhte</i>	36	0,75	0,14	0,86	0,2	0,3	+	+	475
<i>Rahim Abad</i>	29	0,71	0,19	0,81	0,27	0,3	+	+	485
<i>Dorud</i>	29	0,77	0,39	0,61	0,18	0,05	–	+	291
<i>Solegan</i>	39	0,78	0,22	0,78	0,23	0,46	–	+	568
<i>Pole Krakhbast</i>	40	0,71	0,36	0,64	0,32	0,57	+	+	305
<i>Armand</i>	40	0,73	0,62	0,38	0,36	-0,21	–	+	235
<i>Sepid Dashte sezar</i>	37	0,8	0,28	0,72	0,24	0,9	+	+	533
<i>Tang e pang- sezar</i>	34	0,76	0,63	0,37	0,35	-0,53	+	+	200
<i>Tang e pang</i>	38	0,78	0,64	0,36	0,33	0,57	+	+	405
<i>Dashte bozorg</i>	36	0,76	0,37	0,63	0,33	0,61	+	+	217

Продолжение таблицы 1.3

Бассейн р. Сефидруд									
Пост	N	R^2	$k_{ст.}$	$k_{исп}$	C_v	C_s	Однородность по Фишеру	Однородность по Стьюденту	E , мм
<i>Binalud</i>	31	0,71	0,25	0,75	0,22	-0,14	+	+	307
<i>Salamat Abad</i>	27	0,76	0,13	0,87	0,41	1,35	–	+	320
<i>Hashtad Joft</i>	34	0,73	0,2	0,8	0,28	0,2	–	+	278
<i>Gragoni</i>	33	0,73	0,16	0,84	0,31	1,22	–	+	304
<i>Iyanki Kand</i>	39	0,72	0,15	0,85	0,28	-0,02	–	+	283
<i>Sarcham</i>	31	0,82	0,08	0,92	0,23	0,08	–	+	299
<i>Pole Dokhtar</i>	35	0,73	0,14	0,86	0,22	-0,14	–	+	302
<i>Igdomosh (Motor Khane)</i>	30	0,73	0,2	0,8	0,22	0,43	–	+	280
<i>Mahnesan</i>	35	0,72	0,17	0,83	0,31	1,11	–	+	294
<i>Gharngcho (Myane)</i>	36	0,79	0,53	0,47	0,31	1,04	+	+	115
<i>Shahre Chai (Myane)</i>	36	0,8	0,25	0,75	0,21	-0,02	–	+	245
<i>Octor</i>	33	0,74	0,19	0,81	0,19	-0,17	+	+	268
<i>Shadi Abad</i>	26	0,71	0,08	0,92	0,31	-0,17	+	+	283
<i>Gilave</i>	34	0,71	0,2	0,8	0,21	-0,06	–	+	262

Таблица 1.4 – Результаты по второму способу

Пост	$k_{\text{исп.}}$	C_v	C_s	Однородность по Фишеру	Однородность по Стьюденту	E , мм
Бассейн р. Карун						
<i>Patave</i>	0,32	0,30	0,40	–	+	262
<i>Kata</i>	0,31	0,28	0,34	–	+	138
<i>Barez</i>	0,25	0,37	0,27	–	+	140
<i>Kohe Sokhte</i>	0,86	0,23	0,57	–	+	496
<i>Rahim Abad</i>	0,81	0,25	0,48	–	+	470
<i>Dorud</i>	0,61	0,22	0,24	–	+	295
<i>Solegan</i>	0,78	0,23	0,47	–	+	569
<i>Pole Krakhbast</i>	0,64	0,31	0,71	–	+	306
<i>Armand</i>	0,38	0,25	0,43	–	+	234
<i>Sepid Dashte sezar</i>	0,72	0,22	0,18	–	+	528
<i>Tang e pang- sezar</i>	0,37	0,2	-0,07	–	+	210
<i>Tang e pang</i>	0,36	0,24	0,41	+	+	409
<i>Dashte bozorg</i>	0,63	0,33	1,01	–	+	222

Продолжение таблицы 1.4

Бассейн р. Сефидруд						
Пост	$k_{\text{исп.}}$	C_v	C_s	Однородность по Фишеру	Однородность по Стьюденту	E , мм
<i>Binalud</i>	0,75	0,25	0,34	—	+	312
<i>Salamat Abad</i>	0,87	0,40	1,40	+	+	319
<i>Hashtad Joft</i>	0,79	0,3	0,33	—	+	281
<i>Gragoni</i>	0,84	0,32	1,14	—	+	307
<i>Iyanki Kand</i>	0,81	0,28	0,17	—	+	283
<i>Sarcham</i>	0,92	0,27	0,28	—	+	269
<i>Pole Dokhtar</i>	0,85	0,24	0,002	—	+	304
<i>Igdomosh (Motor Khane)</i>	0,79	0,25	0,33	—	+	284
<i>Mahneshan</i>	0,83	0,32	0,98	—	+	295
<i>Gharngcho (Myane)</i>	0,47	0,21	0,46	—	+	119
<i>Shahre Chai (Myane)</i>	0,75	0,26	0,41	—	+	250
<i>Octor</i>	0,81	0,22	0,007	—	+	269
<i>Shadi Abad</i>	0,93	0,32	-0,02	+	+	285
<i>Gilave</i>	0,8	0,23	0,09	—	+	265

1.7 Постановка задач исследований

Описание прототипов

В период времени, предшествующий нашей работе, был выполнен ряд исследований посвященных данной проблеме, в том числе такие как:

- *Ashofteh* и др. ([80], 2013) изучали водосбор *Aidoghmoush*, расположенный на северо-западе Ирана. Использовались данные МОЦАО *Hadcm3* и гидрологическая модель *IHACRES*. В этом исследовании ежемесячные временные ряды будущих температур и осадков были введены в *IHACRES*, и 14-летние временные ряды ежемесячного стока были смоделированы для периода с 2026 по 2039 гг. Исследования показали, что температура будет увеличиваться (от 0,5 до 2,7 C), и годовое значение осадков уменьшается, в сравнении с базисным периодом. По мнению авторов предполагается, что даже без изменения (увеличения) посевной площади, средний многолетний объем спроса воды, требующийся на орошение зерновых, будет увеличиваться на 16% по сравнению с предыдущим периодом;

- *Ghasemi* и другие ([98], 2013) изучали влияние явления изменения климата на режим реки *Shari chai* близь города Урмия в Иране. Рассматривался период с 2010 по 2039 гг. При рассмотрении Атмосферных и Океанических Моделей Общей Циркуляции (МОЦАО), сначала они получили ежемесячные значения температуры и осадков из пяти МОЦАО при базовом периоде (1961–1990) и будущем периоде (2010–2030) под сценарии A2. Использовался метод пропорций и изменения фактора (*change factor*), и принимался во внимание вес каждого параметра (значение осадков и температуры) модели. Затем с полученными значениями температуры и осадков в модели *IHACRES* вычислены будущие расходы воды реки. Путем сравнения полученных таким путем дан-

ных с фактически наблюдаемыми данными было обнаружено, что зимой и осенью расход воды будет увеличиваться, а весной будет уменьшаться;

– *Zareian* и другие ([129], 2014) ученые исследовали влияние изменения климата на бассейн реки *Zayandeh-Rood*, находящейся в Центральной части Ирана, для двух периодов (ближайшего и далекого будущего). Поскольку каждая Атмосферная и Океаническая модель общей циркуляции имеет погрешность, *Zareian* и другие использовали метод, который называется «взвешенный модифицированный метод на основе фактических значений» (*modified weighting method based on actual values (MWM-AV)*). Они с помощью сочетания МОЦАО подготовили различные варианты изменения климата. На основании вариантов изменения климата получены ежедневные временные ряды температуры и осадков, с использованием программы *LARS- WGS*. С использованием метода *MWM-AV* преобразованы временные ряды температуры и осадков и получены местные данные температуры и осадков. По их результатам, увеличение температуры составит 0,59 – 1,34 и 1,02 – 2,53 °С, а изменения осадков будет варьироваться между от +1,78 % до –20,78 % для ближайшего, и от –14,35 % до –32,82 % для отдаленного будущего;

– *Куасси Модест* изучал долгосрочные изменения вероятных характеристик многолетнего стока для Юго-Западной Африки ([45], 2014). Он с помощью методики, разработанной в РГГМУ, выполнив оценку моментов вероятностных распределений, обнаружил, что, за исключением интенсивности климатического шума, остальные параметры будут оставаться неизменными;

– *Шевнина Елена* ([70], 2015) рассматривала характеристики многолетнего максимального стока в условиях неустойчивого климата на территории Российской Арктики, так как, многолетний максимальный сток используется при проектировании таких сооружений, таких как трубопроводы, мостовые переходы, водопропускные сооружения. Для анализа многолетних наблюдений на территории Российской Арктики она использовала 102 гидро-

логических поста. Расчеты были проведены для Четвертого и Пятого доклада МГЭИК. По результатам ее исследований, ожидается, что нормы максимального стока весеннего половодья как и средней температуры воздуха будут увеличиваться по всем рассмотренным сценариям и МОЦАО;

– Sada ([115], 2015) с помощью МОЦАО *CanEsm2* изучал четыре водосбора Виз, Пышма, Вагай и Лакинск, которые расположены в Западносибирской низменности. Сначала он разукрупнил (*downscaled*) ОЦМ программой *SDSM*, и с использованием модели *SWAT* (не путать с *Special Weapons And Tactics*), эмулировал последствия изменения климата на гидрологические режимы. Результаты показывают, что будет увеличение как минимальной, так максимальной температура на всех станциях при всех климатических сценариях. Среднегодовое суточное значение осадков будет увеличиваться в бассейнах Лакинске и Пышмы при всех сценариях, но это увеличение будет отличаться в разные интервалы времени и это зависит от сценариев. Возможное увеличение годовых осадков, главным образом, связано с увеличением осадков осенью и зимой. Также результаты показывают, что годовой сток имеет тенденцию к увеличению при всех сценариях;

– Zamani ([128], 2016) и другие оценили риски сельскохозяйственного водопотребления на основе мультимодальной структуры. По мнению авторов, нехватка воды и изменение климата являются наиболее важным вопросам устойчивости сельского хозяйства и развития водных ресурсов. Они дали оценку рисков изменения климата и его воздействия на сельскохозяйственное водопотребление на Юго-западе Ирана при двух сценариях (A2 и B1) на будущий период (2025–2054). Авторами для их исследования использовались 14 МОЦАО. С помощью метода МОТР (средняя наблюдаемая температура–осадки) и изменения факторов (*change factor*) авторы уменьшили погрешности;

– Stevens и Madani ([120], 2016) изучали влияние изменения климата на урожай кукурузы и обеспечения продовольственной безопасности города

Лилонгве – столицы Республики Малави (Восточная Африка) на три будущих периода времени (2020–2049, 2050–279, и 2080–2109) по трем сценариям (РТК 4,5 и РТК 8,5). Они по методу изменения фактора (*change factor*) и программы *LARS-WGS* разукрупнили выходы моделей (МОЦАО) и получили ежедневные данные осадков и температуры. Результаты показывают, что температура повышается, но годовые осадки не имеют сильного тренда на увлечение или уменьшение;

– *Mahmood* и *Jia* ([107], 2016) исследовали воздействие изменения климата на водные ресурсы реки Джелам, протекающей на границе между Пакистаном и Индией. Ими использовались данные МОЦАО (*Hadcm3*) при двух сценариях (A2, B2) и гидрологической модели (*HEC-HMS*). Метод расчета был настроен, откалиброван и проверен на ретроспективном материале. Они разукрупнили будущие данные осадков и смоделировали речной сток на периоды с 2011 по 2040, с 2041 по 2070 и с 2071 по 2099 гг. Для того чтобы найти изменения в значениях минимального и максимального расходов воды использовался базовый период с 1971 по 2000 гг. Их результаты исследования показали, что без учета воздействий изменения климата надлежащее использование и управление водными ресурсами в этом регионе в будущем будет крайне затруднено.

2 СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОКОВ РЕК

2.1 Методика прогнозирования кривых плотности вероятности годового стока

Динамической основой стохастической модели формирования много-летнего стока является дифференциальное уравнение первого порядка [30]:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{\square}{\tau} \quad (2.1)$$

где, Q – характеристика стока в замыкающем створе речного бассейна (расход, модуль или слой);

$\square$ – осадки (внешнего воздействия);

k – коэффициент редукции стока;

τ – время релаксации речного бассейна, соответствующее радиусу автокорреляции (один год – для многолетнего стока).

Моделью (2.1) интегрально учитываются два основных фактора формирования речного стока:

а) потери выпавших осадков на испарение и фильтрацию воды в почву (последние, по принятым в гидрологии взглядам, при многолетнем осреднении стремятся к нулю) с помощью коэффициента стока k ;

б) инерционность речного водосбора, которая при оперировании среднегодовыми расходами равна, примерно, одному году (это статистически

значимый радиус корреляции, определяемый по автокорреляционной функции рядов годового стока) [29].

Стохастические модели получаются при переходе от использования динамических закономерностей, к стохастическим путем их «зашумления»:

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt, \quad (2.2)$$

Где, $c = 1/k\tau$; $N = \square/\tau$, $c = \bar{c} + \tilde{c}$; $N = \bar{N} + \tilde{N}$ (здесь $\bar{c}$ и $\bar{N}$ – математические ожидания; $\tilde{c}$ и $\tilde{N}$ – белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$ и $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$) [29].

Уравнение (2.2) статистически эквивалентно уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), описывающего эволюцию (изменение во времени) плотности вероятности $p(Q, t)$ марковских случайных процессов, к которым принадлежит и многолетний речной сток:

$$\frac{\partial p(Q, t)}{\partial t} = -\frac{\partial(A(Q, t)p(Q, t))}{\partial Q} + 0,5 \frac{\partial^2(B(Q, t)p(Q, t))}{\partial Q^2} \quad (2.3)$$

В уравнении (2.3) A и B – коэффициенты сноса и диффузии, определяемые формулами:

$$A(Q, t) = -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})Q - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \quad (2.4)$$

$$B(Q, t) = G_{\tilde{c}}Q^2 - 2G_{\tilde{c}\tilde{N}}Q + G_{\tilde{N}}. \quad (2.5)$$

В гидрологии широко используется понятие моментов (по ним находят расчетные гидрологические характеристики). Поэтому уаппроксимируем

уравнение в частных

производных (2.3) системой обыкновенных дифференциальных уравнений для начальных моментов m_i ($i = 1, 4$):

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Для стационарных случайных процессов уравнение (2.3) эквивалентно уравнению Пирсона:

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p \quad (2.7)$$

где, p – плотность вероятности расхода воды Q , м³/с;

a, b_0, b_1, b_2 – коэффициенты.

Решением уравнения (2.7) является семейство кривых $p(Q)$, широко применяемых в практике инженерной гидрологии. Коэффициенты a, b_0, b_1, b_2 подбирают таким образом, чтобы аналитическая кривая $p(Q)$ лучше всего соответствовала эмпирическим точкам. В гидрологии широко используются кривые Пирсона III типа, которые соответствуют решению уравнения (2.7) при $b_2 = 0$. Параметры уравнения Пирсона рассчитываются по формулам [70]:

$$\begin{aligned} a &= 0,5(-m_3 - 4m_1^3 + 5m_1m_2) / (m_2 - m_1^2) \\ b_0 &= 0,5(-2m_2^2 - m_2m_1^2 + m_1m^3) / (m_2 - m_1^2) \\ b_1 &= 0,5(3m_1m_2 - 2m_1^3 - m_3) / (m_2 - m_1^2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

где, m_n – выборочные оценки статистических моментов порядка $n = 1, 2, 3$, рассчитанные по многолетним рядам наблюдений за стоком.

Модель ФПК при стационарном режиме ($\partial p / \partial t \equiv 0$) переходит в уравнение Пирсона, но с коэффициентами, которые связаны с факторами формирования стока:

$$a = (G_{\tilde{N}} + 2\bar{N}) / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}); \quad b_0 = -G_{\tilde{N}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}});$$

$$b_1 = G_{\tilde{N}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}); \quad b_2 = -G_{\tilde{c}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}).$$

Уравнение ФПК может считаться базисной моделью гидрологии. Она позволяет решить гидрологические проблемы, связанные с оценкой гидрологических последствий изменения климата и влиянием антропогенных воздействий на водный режим бассейнов.

При проведении долгосрочной оценки вначале по рядам наблюдений вычисляются m_n , затем производится параметризация уравнений для моментов 2.6 – находятся численные значения параметров, отвечающие за формирование плотности вероятности и связанные с физико-географическими свойствами бассейна. Затем найденные параметры изменяются за счет факторов подстилающей поверхности или/и за счет климата. Далее производится вычисление новых оценочных моментов m_n , по которым определяются расчетные гидрологические характеристики (норма, коэффициенты вариации и асимметрии).

При прогнозе использовался упрощенный вариант методики, который адаптирован к практическому применению [28]. Адаптация заключалась в ряде допущений:

а) использовалось фиксированное отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации;

б) процесс формирования многолетнего стока рассматривался как статистически стационарный, так как сами климатические сценарии предполагают метеорологические характеристики на определенный временной промежуток в несколько десятилетий статистически стационарными;

в) не учитывалась интенсивность внутренних шумов $G_{\tilde{c}}$, это позволяет получать устойчивые оценки фактических и прогнозных величин.

Система 2.6 сводится к двум алгебраическим уравнениям для m_1 и m_2 в которых присутствует только $a = 2\bar{N}/2\bar{c}$ и $b_0 = -G_{\tilde{N}}/2\bar{c}$; параметры характеризующие интенсивности шумов $G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{cN}}, G_{\tilde{N}}$ принимаются постоянными, но в данном упрощении используется только один параметр $G_{\tilde{N}}^{\text{оп}} = G_{\tilde{N}}$.

Таким образом, для оценки гидрологических последствий изменения климата для рек Каруна и Сефидруда использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0, \\ -2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\tilde{N}} &= 0. \end{aligned} \tag{2.9}$$

где, $\bar{c}$ – математическое ожидание параметра обратного коэффициенту многолетнего стока;

m_1, m_2 – первый и второй начальные моменты, зная которые можно определить норму и коэффициент вариации стока;

$\bar{N}$ – норма осадков;

$G_{\tilde{N}}$ – интенсивность белого шума осадков.

Так как $\tau=1$ (рассматривается многолетний годовой сток), то $\bar{c} = 1/\bar{k}$, $\bar{N}=\bar{X}$. Сначала, зная m_1, m_2 и $\bar{X}$ находим $\bar{c}$ и $G_{\tilde{N}}$. Затем, определяется прогнозное значение коэффициента стока. Используется выражение для коэффициента стока $k = \bar{Q}/\bar{X} = 1 - \bar{E}/\bar{X}$, полученное из уравнения водного баланса для замкнутых речных водосборов ($\bar{Q} = \bar{X} - \bar{E}$). В главе два будет выражено, что вместо испарения используется коэффициент испарения.

В новом климате величина $G_{\tilde{N}}$ останется прежней, так как в сценарии нет информации о возможном изменении дисперсии осадков. Используя систему 2.9, находятся прогнозные значения начальных моментов $m_1^{\text{пр}}$, $m_2^{\text{пр}}$, а затем находится прогнозное значение коэффициента вариации $C_v^{\text{пр}}$ ($C_v = \sqrt{m_2 - m_1^2} / m_1$). Прогнозный коэффициент асимметрии находится по соотношению с коэффициентом вариации.

2.2 Апробация методики для Ирана (ретроспективные оценки)

В настоящее время факт изменения климата подтверждается инструментальными данными [29]. Возникает задача оценки последствий изменения климата на различные отрасли экономики. Существует несколько подходов в этом направлении (см. например, [24, 28, 30, 71]), в том числе методика, разработанная в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ) [25].

Целью исследования этого раздела является апробация методики РГГМУ на речных бассейнах Ирана на ретроспективном материале, т. е. составление поверочных прогнозов статистических характеристик речного стока.

Методика ретроспективных прогнозов

Здесь приводится методика в кратком виде.

В основе методики РГГМУ лежит уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), которым описывают эволюцию плотности вероятности

марковских случайных процессов. Частным случаем уравнения ФПК для стационарных случайных процессов является уравнение Пирсона:

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2} p, \quad (2.10)$$

где, p – плотность вероятности;

Q – характеристика речного стока;

a, b_0, b_1, b_2 – постоянные коэффициенты.

Решением уравнения (2.10) является семейство кривых плотности вероятности Пирсона, используемые в инженерной гидрологии. Так как к уравнению Пирсона переходим от ФПК, то коэффициенты приобретают физический смысл, связываясь со свойствами подстилающей поверхности и внешними климатическими факторами. Следовательно, наличие сценарных оценок климатических элементов позволяет оценить возможное сценарное распределение стока.

С учетом того, что климатические сценарии имеют квазистационарный характер (т. е. без изменений за данный интервал времени, за который заданы сценарные оценки метеозадающих элементов) для практического применения уравнение ФПК можно аппроксимировать системой уравнений для начальных статистических моментов m_i ($i = 1, 2$):

$$\begin{aligned} -\bar{c} m_1 + \bar{N} &= 0; \\ -2\bar{c} m_2 + 2\bar{N} m_1 + G_{\bar{N}} &= 0, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где, $\bar{c} = 1/k\tau$; $\bar{N} = \bar{X}/\tau$;

k – коэффициент стока;

τ – время релаксации речного бассейна (для многолетнего стока $\tau = 1$ год);

$G_{\tilde{N}}$ – интенсивность климатического шума;

$\bar{X}$ – интенсивность осадков;

m_1, m_2 – первый и второй момент соответственно.

Данная система упрощена от первоначального варианта по следующим соображениям [25]:

а) не учитывается коэффициент эксцесса из-за небольшой продолжительности рядов, приводящей к большим погрешностям при построении вероятностного распределения стоковых характеристик;

б) для коэффициента асимметрии C_s используется его районное соотношение с коэффициентом вариации C_v ;

в) ликвидируются внутренние и взаимные шумы системы для получения устойчивых решений в текущем и в ожидаемом климате;

г) интенсивность климатического шума $G_{\tilde{N}}$ принимается постоянной при изменении климата.

Перед использованием системы уравнений (2.11) для сценарной оценки вероятностных распределений многолетнего годового стока Ирана, необходимо проверить выполнения допустимых условий ее применимости и обосновать справедливость расчетов будущих состояний исследуемого процесса по рассматриваемой методике. Эти можно сделать на основе имеющихся ретроспективных рядах наблюдений.

Алгоритм ретроспективных прогнозов характеристик стока содержит следующие этапы.

а) Разделение ряда расходов воды на части максимально неоднородные друг к другу. Для этого были построены разностно-интегральные кривые, которые показали, что все ряды имеют маловодный и многоводный периоды. На рисунке 2.1 представлен алгоритм выбора года максимального расхождения однородности по среднему. Необходимо было найти год, делящий ряд

наблюдений на два периода, разница по среднему между которыми максимальная.

По описанному алгоритму были определены года максимального расхождения однородности по среднему для 5 % у. з.

б) Параметризация и прогноз. По данным о средних значениях стока и осадков одной части рассчитываются начальные моменты m_1 , m_2 и коэффициенты вариации и стока. Зная коэффициент стока, можно определить параметр $\bar{c}$. Далее обратным решением системы (2.11) находится величина интенсивности климатического шума $G_{\tilde{N}}$. На этом заканчивается этап параметризации модели.

Далее, зная $G_{\tilde{N}}$, параметр $\bar{c}$ и норму осадков за вторую часть ряда, можно определить прогнозные значения моментов m_i путем решения системы (2.11). От моментов переходим к прогнозным значениям статистических характеристик (норма, C_v и C_s). Коэффициент асимметрии определяется по соотношению C_s/C_v , коэффициент вариации по формуле $C_v = \sqrt{m_2 - m_1^2} / m_1$.

Осуществлялись прямые (параметризация производилась по первой части ряда, а прогноз давался на вторую часть) и обратные (параметризация производилась по второй части ряда, и прогноз давался на первую часть) прогнозы. При прогнозах коэффициент стока оставлялся постоянным, т. е. рассчитанным по параметризуемой части ряда [13].

Результаты, полученные по ретроспективным прогнозам (норма, коэффициенты вариации и асимметрии стока), позволяют построить прогнозные кривые обеспеченностей, которые сравнивались с фактическими. Пример сравнения таких кривых показан на рисунке 2.2. Большинство прогнозных кривых имеют значимые отклонения от фактических в зоне малых и больших обеспеченностей.

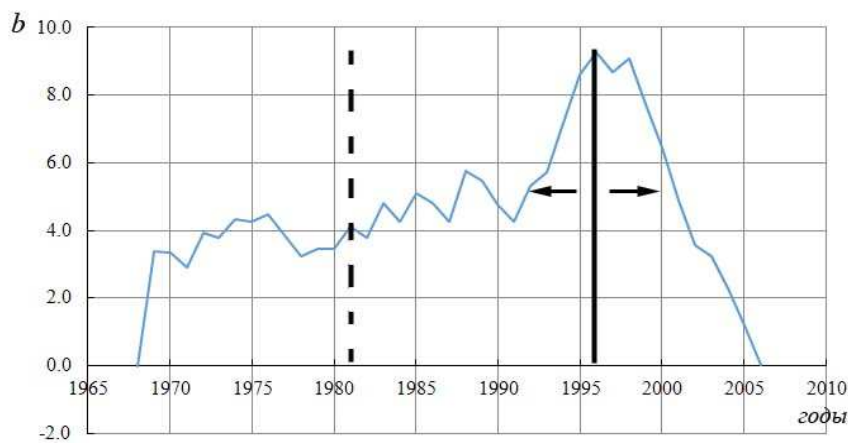
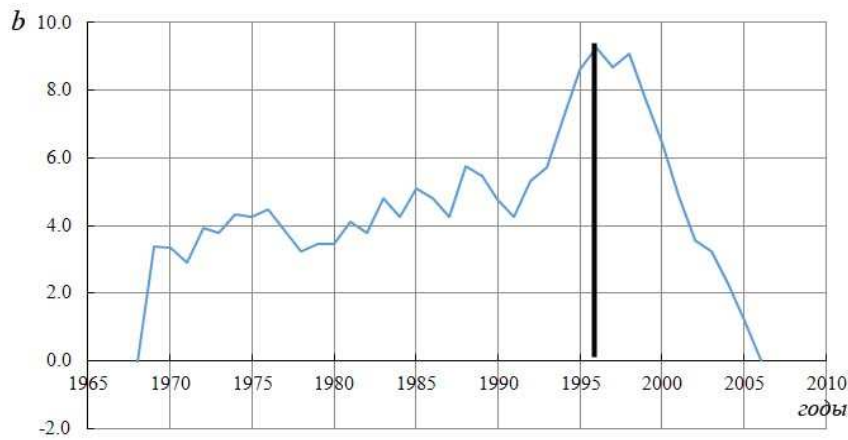
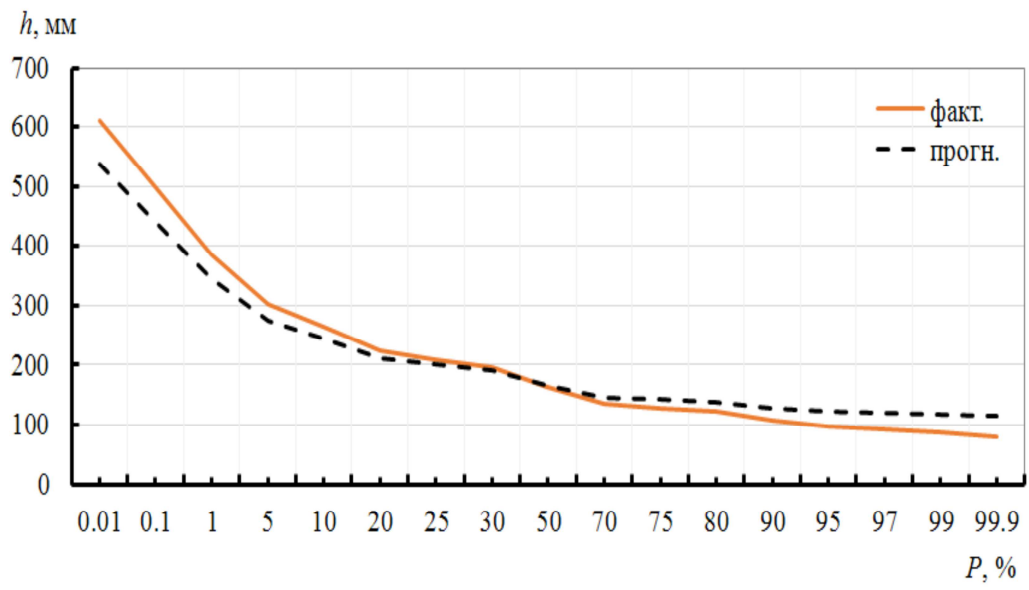


Рисунок 2.1 – Алгоритм разделения рядов стока на две части ($b = \sum(K_i - 1)/C_v$, где K_i – модульный коэффициент).

а)



б)

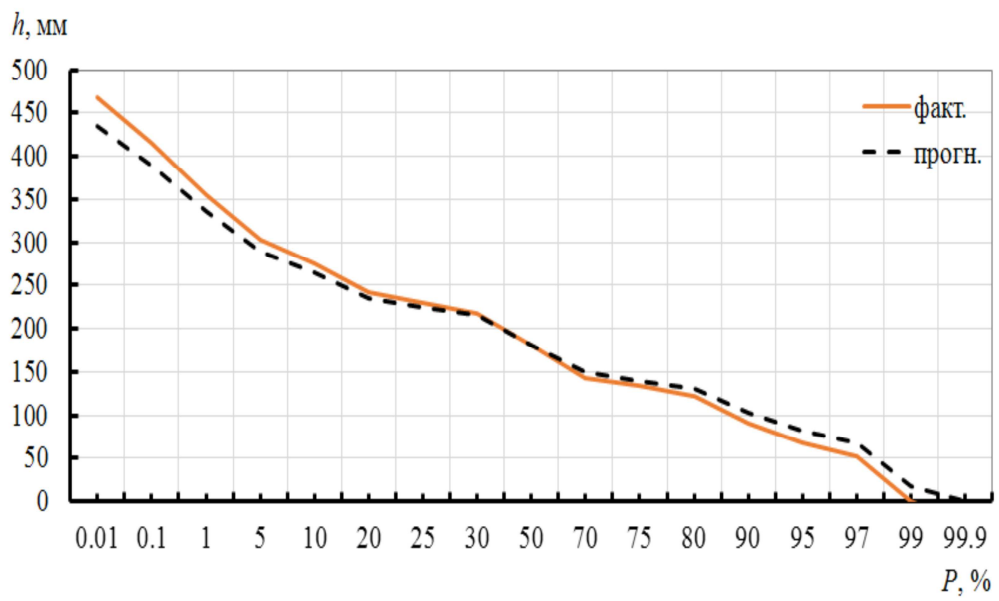


Рисунок 2.2 – Пример фактических и прогнозных кривых обеспеченностей: а – прямой прогноз, б – обратный прогноз (пост *Pole Kereh Bast* бассейна р. Карун).

Оценка эффективности ретроспективных прогнозов (т. е. Проверка соответствия прогнозной кривой фактической) производилась по критерию согласия Пирсона (χ^2) [82, 119]; результаты показаны в таблице Б.1 для двух уровней значимости (у.з.).

Анализ таблицы Б.1 показал, что при прямом прогнозе оправдалось 20 прогнозов из 28 (для уровней значимости 5 и 10 %), что составляет 71 %. При обратном прогнозе оправдалось 19 прогнозов, что составляет 67 %. В общей сложности, оправдалось 39 прогнозов из 56 – это составляет 69 %. Методика, по которой получены подобные результаты, относится по эффективности прогнозов к категории удовлетворительных. Улучшение результатов прогноза можно получить при использовании локальных связей, например, коэффициента стока климатическими характеристиками или факторами подстилающей поверхности. Установление подобных связей позволит прогнозировать коэффициент стока в зависимости от климатических и антропогенных сценариев.

Итак, при прогнозировании статистических характеристик речного стока Ирана на ретроспективном материале получены удовлетворительные результаты, которые можно улучшить использованием региональных зависимостей параметров прогнозного уравнения от климатических характеристик.

2.3 Выбор климатической модели для оценки гидрологических последствий изменения климата в речных бассейнах Ирана

Выбор климатической модели основывается на результатах уже сделанных исследований коллективом иранских авторов [97].

Модельные сумма годовых осадков и среднегодовая температура приземного воздуха оценивались на ретроспективном материале с помощью показателей *RMSE* (аналог среднеквадратической ошибки) и *MBE* (расшифровывается как *Mean Bias Error statistics*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{n}}, \quad (2.12)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)}{n}, \quad (2.13)$$

где, O_i – наблюдаемые значения метеовеличин на время i ;

E_i – модельные значения метеовеличин на время i .

В источнике [97] доказано, что климатические модели *MPI-EFM-LR*, *BCC-CSM1* и модель *MPI-ESM-MR* (из 38 моделей) для осадков и модели *MPI-ESM-MR*, *CESM1(BGC)* и модель *CCSMU* для температуры дают минимальные значения *RMSE* и *MBE* (см. рисунки 2.3 и 2.4). Поэтому используются результаты трех моделей (общей циркуляции атмосферы или океана) *MPI-ESM-MR*, *CESM1 (CAM5)* и *BCC-CSM1 (1M)* в этом исследовании. Свойства моделей показаны в таблице 2.2.

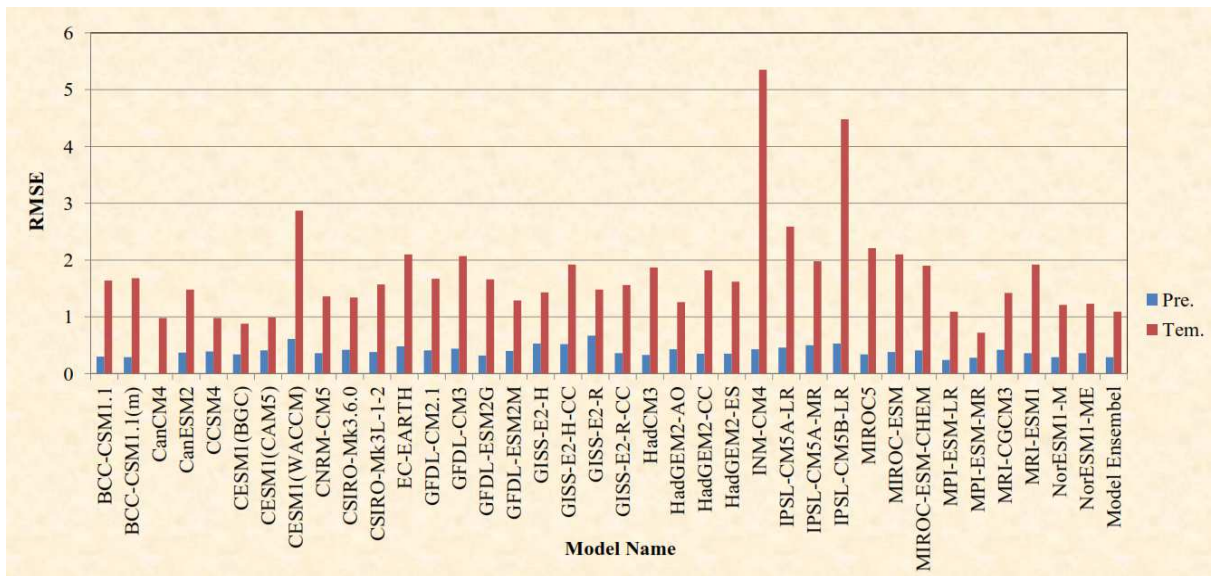


Рисунок 2.3 – Значения величины $RMSE$ для климатических моделей для осадков (мм/день) и температуры ($^{\circ}C$) [97].

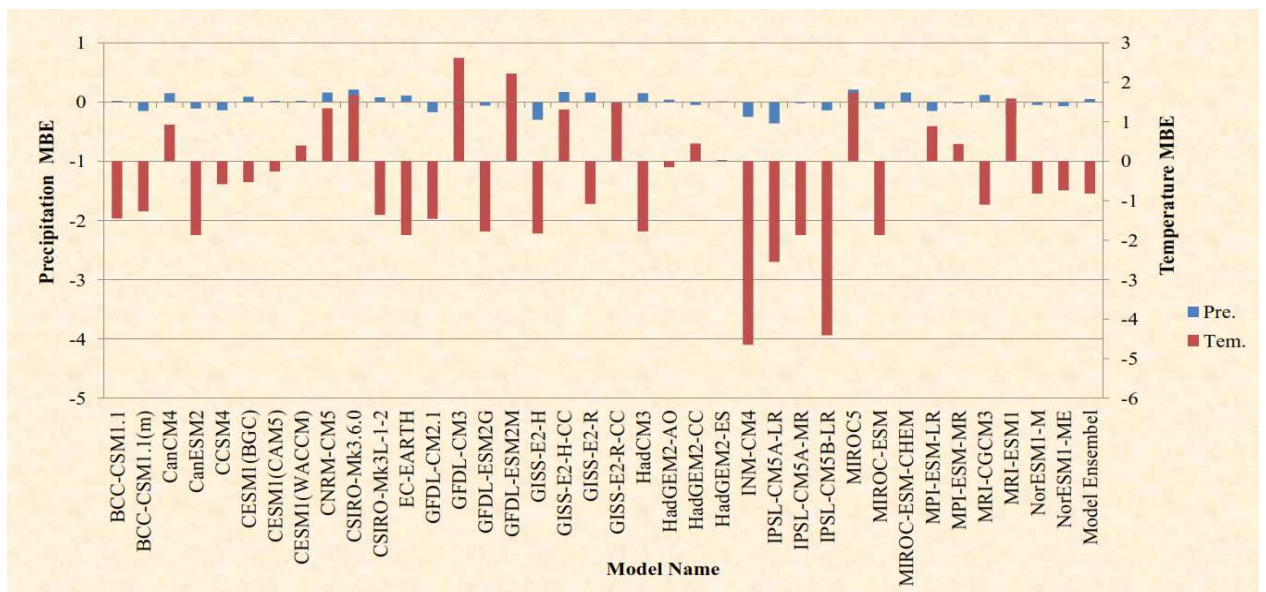


Рисунок 2.4 – Значения величины MBE для климатических моделей для осадков (мм/день) и температуры ($^{\circ}C$) [97].

Таблица 2.2 – Свойства модели *MPI-ESM-MR*, *CESM1(CAM5)* и *BCC-CSM1(1M)* для осадков и температуры

Название модели	Организация	Диск-рети-зация	Размеры		
			Время (с 2006 по 2100)	широта, град.	долгота, град.
<i>Max-Planck-Institute Earth System Model run- ning on mixed resolution grid (MPI-ESM-MR)</i>	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>	месячные	1140	1–180	1–360
<i>Community Earth System Model version 1 that in- cludes the Community Atmospheric Model ver- sion 5 (CESM1-CAM5)</i>	<i>National Cen- ter for Atmos- pheric Re- search) Boul- der, CO, USA</i>	месячные	1140	1–180	1–360
<i>Beijing Climate Center Climate System Model (BCC–CSM)</i>	<i>Beijing Cli- mate Center, China Meteor- ological Ad- ministration, China</i>	месячные	1140	1–180	1–360

2.4 Разукрупнение масштабов моделей

Результаты МОЦАО (модель общей циркуляции атмосферы и океана) на крупном масштабе не соответствует требованию разрешения (резолюции) для большинства региональных исследований, поэтому значительным объемом информации (составляющие региональной топографии, результаты землепользования и пр.) пренебрегается. Следовательно, предварительные результаты МОЦАО не подходит для регионального анализа, в связи с чем необходимо привязывать переменные к более мелкому региональному разрешению [112]. Таким образом, с целью улучшения применимости результатов МОЦАО и оценок климатических сценариев изменения климата необходимо разукрупнение масштаба и уменьшение разрешения. Процесс преобразования крупного масштаба в мелкий (меньший) масштаб и называется разукрупнением (Загрузка прогностических метеорологических данных AR5 с сайтов *Earth System Grid Federation (ESGF)*) [93].

Для разукрупнения существует два основных подхода – динамический и статический [80, 81, 99, 128].

Статические методы выполняются путем эмпирических математических зависимостей между климатическими переменными и региональным масштабом переменных [127]. Статические методы достаточно точны, используются для получения среднего значения осадков по области [96].

В данном исследовании используется наиболее распространенный Дельта-метод, который относится к статическим методам. Дельта-подход или изменчивый фактор (*change factor*) – это соотношение между фактическими и модельными данными. Такое соотношение и используется в качестве мультипликативного (для осадков) или аддитивного (для температуры) фактора для получения прогнозируемых значений [99, 127, 128]. Основным преимуще-

ством Дельта-метода является его простота и скорость применения, что позволяет его использовать во многих исследованиях оценки воздействия изменений климата.

В общем виде процедура уменьшения масштабирования состоит в следующем.

а) Получение исходных данных.

В этом исследовании используются результаты 3-х МОЦ (Модель общей циркуляции): *bcc-csm1-m1*, *CESM1-CAM5* и *EMP-ESM_MR*, в рамках двух сценариев выбросов (РТК 2.6 и 8.5, как экстремальных климатических сценариев) из Пятого доклада МГЭИК. Исходные данные получены благодаря программе, которая была написана на языке *Visual Basic* (Приложение Ж).

б) Метод «МОТП» (*Mean Observed Temperature-Precipitation (MOTP) method*) и вероятностные оценки.

На этом этапе, после получения ежемесячных климатических переменных МОЦАО для РТК 2.6 и 8.5 (за базовый период брались года с 1971 по 2000), вычислены различия между наблюдаемыми и модельными долгосрочными среднемесячными значениями температуры и осадков. Это помогает оценить способность каждого МОЦАО использоваться для восстановления базовых осадков и температуры с помощью среднего значения наблюдений.

Вкратце «МОТП» можно представить формулами 2.14 и 2.15 [99]:

$$TE_m^{G_i} = \left| \left(\bar{T}_m^B \right)_{G_i} - \left(\bar{T}_m^B \right)_O \right| \quad (2.14)$$

$$PE_m^{G_i} = \left| \left(\bar{P}_m^B \right)_{G_i} - \left(\bar{P}_m^B \right)_O \right|, \quad (2.15)$$

где $TE_m^{G_i}$ и $PE_m^{G_i}$ – абсолютные погрешности каждого МОЦАО в оценке температуры и осадков, соответственно (абсолютная разница в количестве осадков или температур);

G – определенная модель;

i – счетчик моделей;

$\bar{T}$ и $\bar{P}$ – среднее значение температуры и осадков, и буква B показывает базовый период с 1971 по 2000 гг., а индекс m обозначает рассматриваемый месяц;

O –наблюденные данные у каждой метеостанции в течение с 1971 по 2000 за i -й месяц.

в) Оценка вероятности.

Неудивительно, что у результатов МОЦАО, равно как и любого другого метода, существуют различные погрешности. Эти погрешности влияют на уверенность в результатах исследований. Для того чтобы снизить погрешности модели МОЦАО, каждой модели приписывается весовой коэффициент. Этим весом определяется, насколько точно прогнозирование, у каждой конкретной модели, т. е. определяется надежность каждой модели.

Мы присваивали весовой коэффициент каждой модели путем вычисления, таких параметров как осадки и температура. Разница между среднемесячными значениями наблюдаемых и вычисляемых показателей, базовый период (с 1971 по 2000 гг.) вычисляется следующим образом:

$$WT_m^{G_i} = \frac{1/TE_m^{G_i}}{\sum_{i=1}^n (1/TE_m^{G_i})} \quad (2.16)$$

$$WP_m^{G_i} = \frac{1/PE_m^{G_i}}{\sum_{i=1}^n (1/PE_m^{G_i})} \quad (2.17)$$

где, $WT_m^{G_i}$ и $WP_m^{G_i}$ – это вес каждой модели в прогнозе месячных температуры и осадков в каждом месяце за базовый период (1971–2000 гг.),

n – количество моделей.

Вместо вычисления единого весового коэффициента на целый год, вес рассчитывается ежемесячно для того чтобы повышать точность прогнозирования.

Определение закономерности изменения климата (генерация сценариев изменения климата) 30-летний период с 2020 по 2049 гг. выбирается как ближайшее будущее (ББ), а 30-летний период с 2050 по 2079 гг. считается далеким будущим (ДБ). Изменения температуры и осадков считаются с помощью приводимых уравнений 2.18–2.21:

$$\Delta T_m = \sum_{G=I}^n \{ WT_m^{G_i} \cdot TCF_{G_i} \} \quad (2.18)$$

$$TCF_G = \left((\bar{T}_m^F)_{G_i} - (\bar{T}_m^B)_{G_i} \right) \quad (2.19)$$

$$\Delta P_m = \sum_{G=I}^n \{ WP_m^{G_i} \cdot PCF_{G_i} \} \quad (2.20)$$

$$PCF_G = \left(\frac{(\bar{P}_m^F)_{G_i}}{(\bar{P}_m^B)_{G_i}} \right) \quad (2.21)$$

где, TCF_G – разность температуры между будущим и базовым для каждого МОЦАО (С°);

PCF_G – разница осадков между будущим и базовым для каждого МОЦАО (%);

$\bar{T}_m^F$ и $\bar{P}_m^F$ – среднее значение 30-летних температуры и осадков на будущие периоды (2020–2049 и 2050–279 гг.);

ΔT_m и ΔP_m – изменения температуры и осадков (также ΔT_m и ΔP_m называются сценариями изменения климата для температуры и осадков).

г) Уменьшение масштаба.

Для уменьшения масштаба используется метод изменения фактора (*change factor*). В этом методе, для получения временных рядов климатических сценариев на будущее, к сценариям изменения климата добавляются наблюдаемые данные (с 1971 по 2000 гг.)

$$T = T_{obs} + \Delta T_m, \quad (2.22)$$

$$P = P_{obs} \cdot \Delta P_m, \quad (2.23)$$

где, T_{obs} и P_{obs} – временные ряды наблюдаемых данных на базовом периоде для температуры и осадков, соответственно;

ΔT_m и ΔP_m – сценарии изменения климата для температуры и осадков (см. рисунки 2.5 и 2.6).

На рисунке 2.5 представлена схема метода МОТП, а на рисунке показаны алгоритмические шаги данного метода.

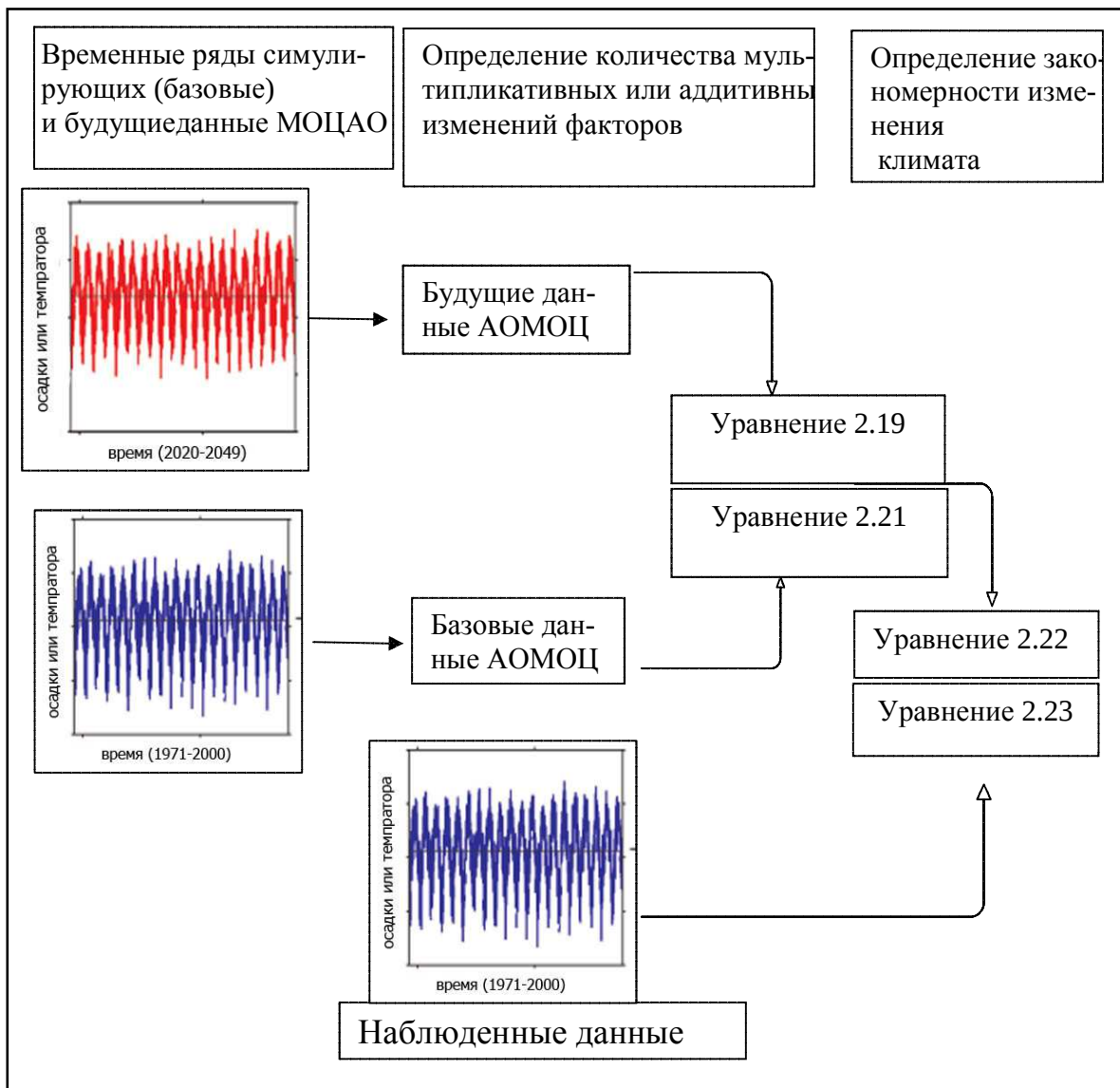


Рисунок 2.5– Схема метода МОТП.

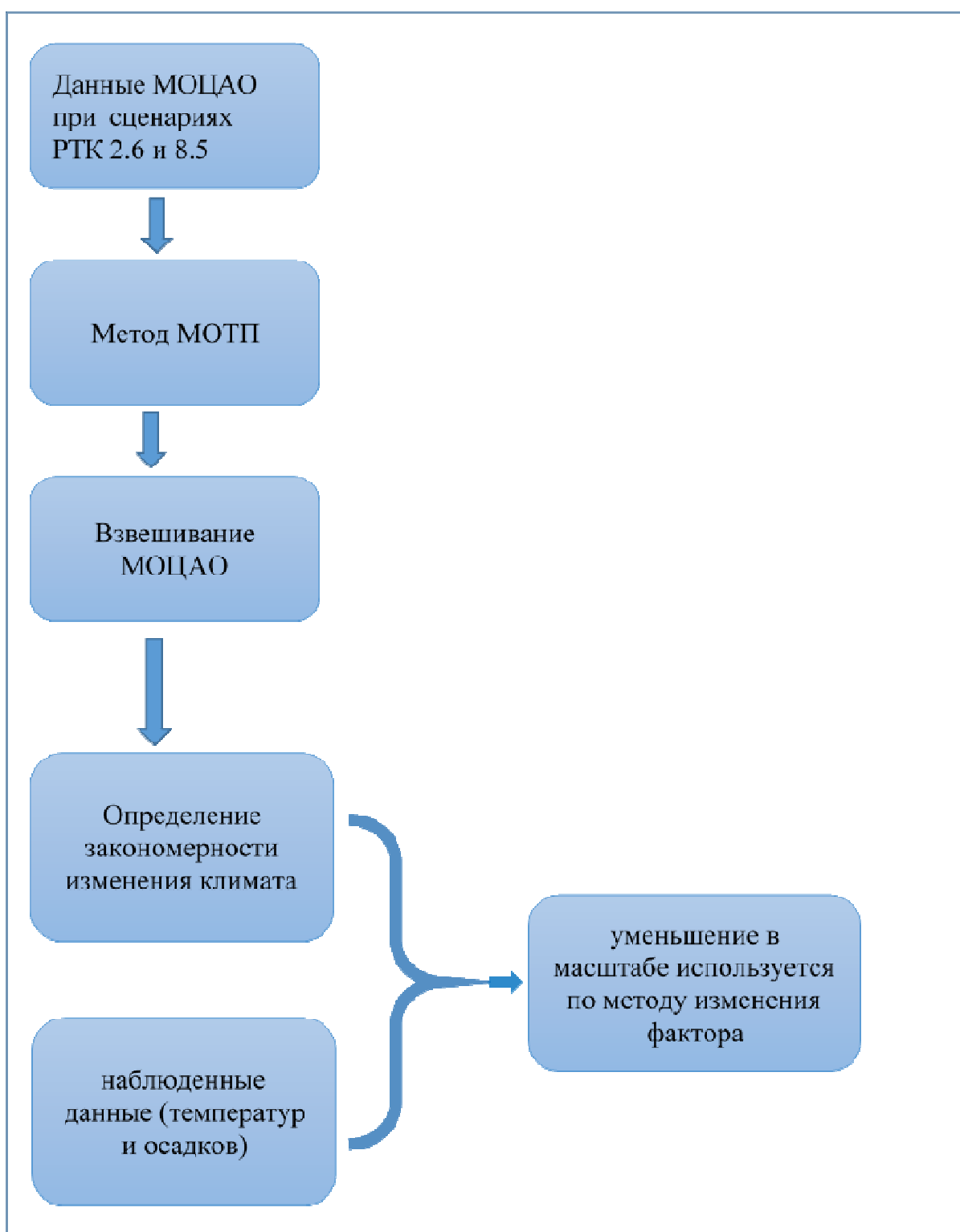


Рисунок 2.6 – Шаги выполнения метода МОТП.

Результаты разукрупнения моделей

В этом разделе представляются результаты месячных норм осадков и температуры при РТК 2,6 и 8,5 по методу МОТП.

Изменение осадков

Средние многолетние изменения месячных осадков в течение будущих периодов (2020–2049, 2050–2079), по сравнению с предыдущим периодом (1971–2000), для бассейнов р. Карун (см. таблицу Б.2) и р. Сефигуд (см. таблицу Б.3) представлены в процентах. Карты на рисунках 2.7 и Б.1– Б.3 показывают образцы долгосрочного изменения режима осадков (2020–2049, 2050–2079) по сравнению с предыдущим периодом. Поскольку количество осадков в теплые месяцы (июль, июль, август и сентябрь) очень невелико и составляет несколько миллиметров, то их колебания можно игнорировать как несущественные. Первый вывод, заключается в том, что процессу прогнозирования осадков предшествует период наблюдения за осадками.

Ниже, для каждого периода для сценариев РТК 2,6 и РТК 8,5 описывается изменение осадков.

Карун (РТК 2,6 с 2020 по 2049 гг.)

Январь – кроме станции *Rahim Abad*, остальные имеют менее 10 % изменений. На юго-востоке бассейна р. Карун ожидается снижение осадков между 1–3 %, другие станции имеют 2 до 9 % повышения осадков.

Февраль – между 1 – 8% наблюдается повышение количества осадков.

Март – на северо-западе и западе имеет место уменьшение, в остальных случаях увеличение осадков.

Апрель – в этом месяце по всем постам наблюдается уменьшение осадков.

Май – кроме центра бассейна р. Карун остальные территории

претерпевают повышение осадков.

Три месяца октябрь, ноябрь и декабрь (осенний сезон) модели МОЦАО предсказывают повышение количества осадков по всему бассейну р. Карун. При этом значение осадков в ноябре и декабре превышает показатели в Октябре.

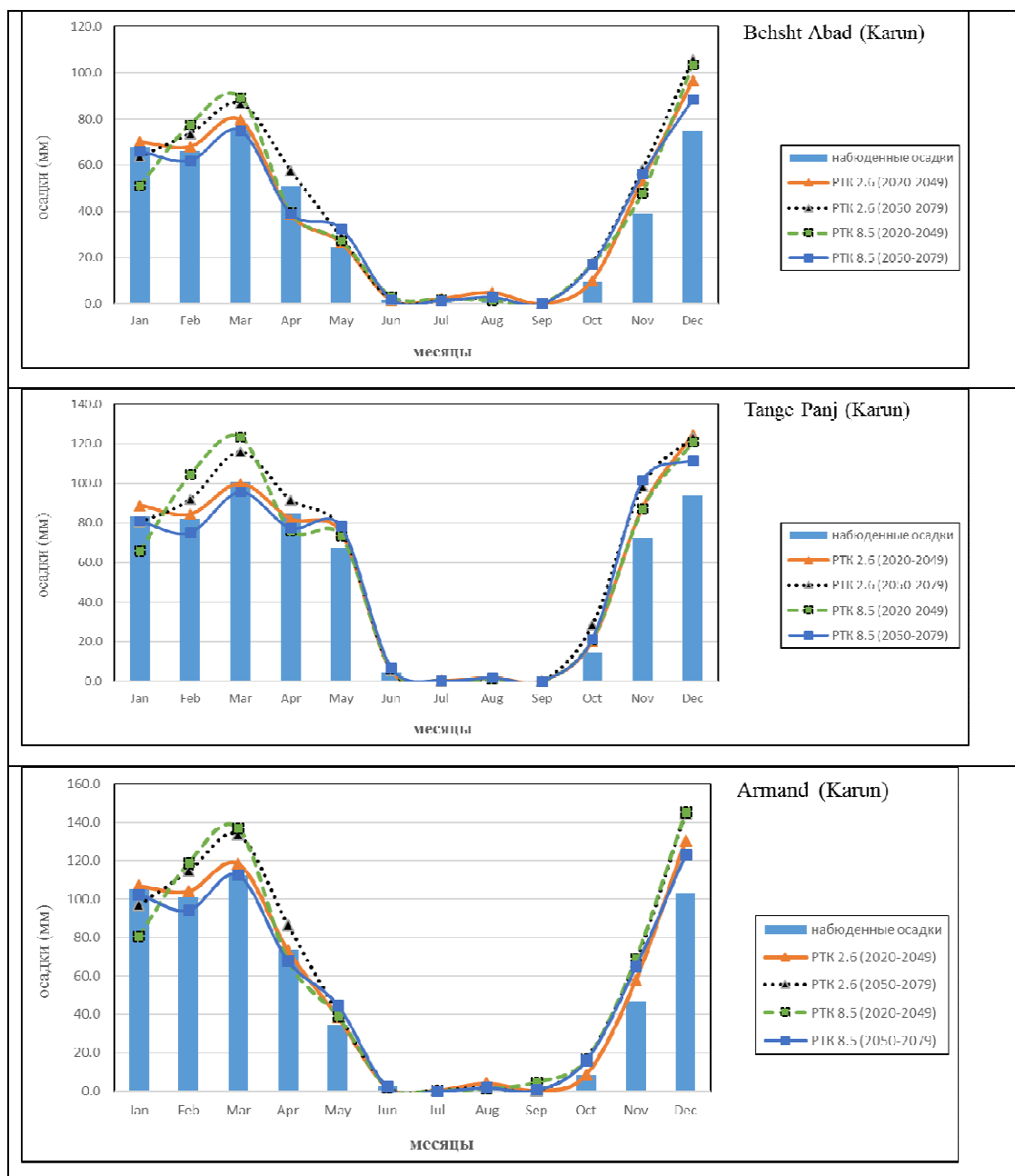


Рисунок 2.7 – Изменения осадков для будущего климата для 3 постов для бассейна р.Карун (*Behsht Abad*, *TangePanj* и *Armand*).

Сефидруд (РТК 2,6 с 2020 по 2049 гг.)

Январь и февраль – по всему бассейну р. Сефидруд наблюдается измерение осадков между 3–20 % (за исключением станции *Shadi Abad* в феврале).

Март – в юго-западной зоне осадки уменьшаются, на остальных территориях количество осадков увеличивается (0,6 – 12,6 %).

Апрель – для бассейна р. Сефидруд для РТК 2,6 получено наибольшее изменение показателей осадков. Местами осадки уменьшаются до –22% в другие места увеличивается до +35%.

Май – кроме одной станции, осадки повышаются (1,2 – 23,3 %).

Карун (РТК 8,5 с 2020 по 2049 гг.)

Январь – в бассейне р. Карун в этом месяце ожидается только уменьшение осадков (13,6 – 24,6 %).

Февраль и март – по всей территории осадки повышаются (11 – 39,4 %).

Май – в центральной и северно-западной зонах осадки увеличиваются.

В осенние месяцы по всей территории бассейна р. Карун количество осадков увеличивается, при этом в октябрь больше, чем в ноябре.

Сефидруд (РТК 8,5 с 2020 по 2049 гг.)

В месяцы февраль, март и май осадки увеличиваются. В январе на юге и юго-западе осадки уменьшаются, на остальной территории количество осадков увеличится.

Апрель – на севере и в центре осадки уменьшаются, в остальных районах – наоборот.

Октябрь – на юге в бассейне р. Сефидруд осадки уменьшатся на 14 %.

Ноябрь – в центре и на западе осадки снижаются, в других местах – увеличиваются.

Декабрь – по сравнению с другими месяцами в декабре наблюдается наибольшее увеличение осадков по всей территории бассейна р. Сефидруд.

Карун (РТК 2.6 с 2050 по 2079 гг.)

В январе, кроме двух станций, прогнозируется уменьшение осадков. В феврале, марте и апреле по всей территории осадки увеличиваются сильнее, чем в первом периоде. В мае, кроме одной станции, которая имеет уменьшение на 38 %, у других станций наблюдается увлечение осадков (выше первого периода). Для осенних месяцев наблюдается увеличение осадков. Так в сентябре имеет место наибольшее увеличение, по сравнению с другими месяцами (например, станция *Kata* имеет 0,1 мм и ожидается, что оно составит 3,1 мм).

Сефидруд (РТК 2.6 с 2050 по 2079 гг.)

Январь характеризуется увеличением осадков, но это меньше, чем в первый период. В феврале, марте и апреле значения количества осадков увеличивается. Также на юге территории не наблюдается никакого увеличения. В мае есть незначительное увеличение (до 7 %). В осенних месяцах увеличение осадков не ожидается.

Карун (РТК 8,5 с 2050 по 2079 гг.)

В январе осадки уменьшатся, особенно это заметно на станции *Dashte Bozorg*. Также в феврале, марте и апреле наблюдается уменьшение осадков. В мае и осенних месяцах по всей территории осадки увеличиваются.

Сефидруд (РТК 8,5 с 2050 по 2079 гг.)

В январе ожидается увеличение количества осадков выше первого периода (РТК 8,5 с 2020 по 2049). В феврале в южной и юго-восточной части осадки сокращаются примерно от 5 до 17%. В течение марта снижение составляет от 1,7 до 16,6%. В апреле наблюдаются различные изменения. В выводах модели

наблюдается, что в одних местах они снизились на 23%, а в других увеличившись на 20%. В мае изменения осадков происходит схоже с первым периодом (РТК 8,5 с 2020 по 2049). У осенних месяцев наблюдается увеличение осадков.

Изменение температуры

Из-за отсутствия достаточных данных наблюдений за температурой на метеорологических станциях (в бассейне р. Карун только 9 станций и в бассейне р. Сефидруд 7 станций) изменения температуры для будущего климата рассматривается, как результат интерполирования для всей площади водосборов. Рисунки 2.8 и 2.9 показывают расположение станций для изучения температуры.

Наибольшее увеличение температуры ожидается в летние месяцы (июль, август и сентябрь). В бассейнах рек Карун и Сефидруд температура увеличивается от 0,6 С° до 5,4 С°. Наименьшее увеличение – в зимние месяцы. В период с 2050 по 2079 при сценарии РТК 8,5 ожидается наибольшее увеличения температуры. В таблицах Б.4 и Б.5 представлены колебания температуры в бассейнах р. Карун и Сефидруд. В таблицах 2.3 и 2.4 представлены среднее значение колебания температуры будущего относительно настоящего времени. Также на картах рисунков Б.4 и Б.5, в качестве примеров, представлены изменения температуры в бассейнах р. Карун и Сефидруд.

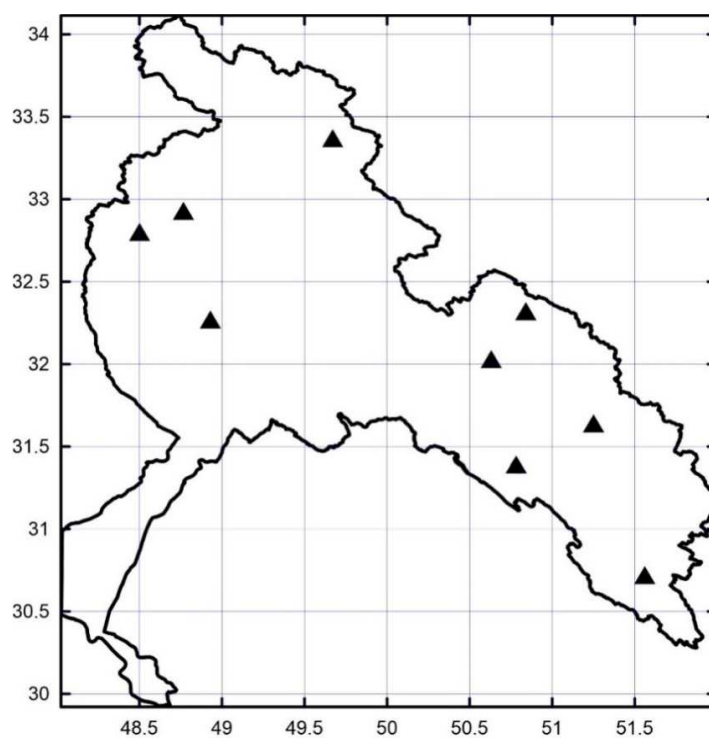


Рисунок 2.8 – Расположение станций исследования колебаний температуры для бассейна р. Карун.

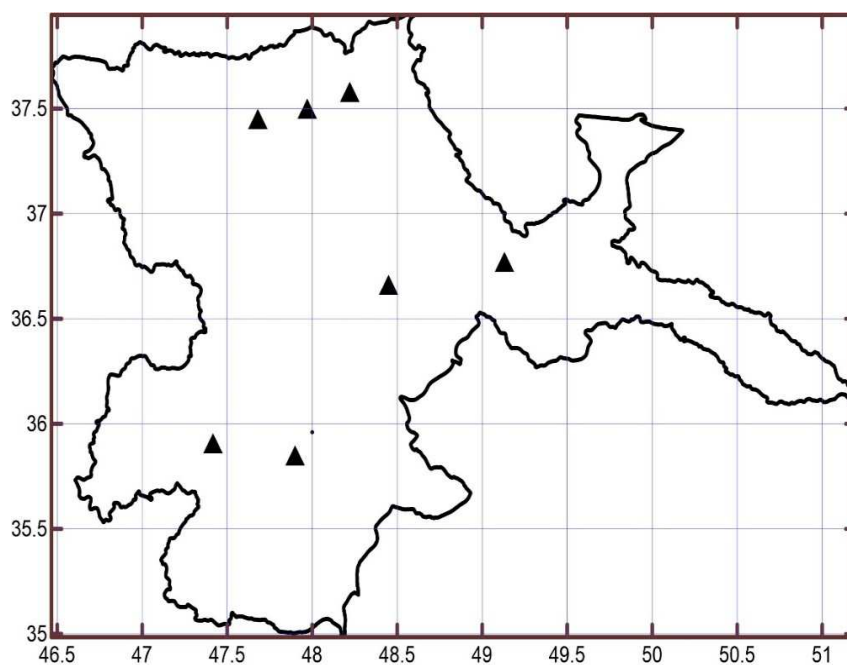


Рисунок 2.9–Расположение станций исследования колебаний температуры для бассейна р. Сефидруд.

Таблица 2.3 –Среднее значение колебания температуры будущего климата относительно настоящего времени для бассейна р. Карун (С°)

Пункт	РТК2,6		РТК8,5	
	с 2020 по 2049	с 2050 по 2079	с 2020 по 2049	с 2050 по 2079
<i>Dorud Tire</i>	1,5	1,7	1,8	3,8
<i>Behsh Abad</i>	1,4	1,7	1,8	3,8
<i>Rahim Abad</i>	1,4	1,6	1,8	3,8
<i>Armand</i>	1,4	1,7	1,8	3,8
<i>Dashe Bozorg</i>	1,4	1,6	1,8	3,8
<i>Pole Krakhbast</i>	1,5	1,7	1,8	3,8
<i>Sologan</i>	1,5	1,7	1,9	3,8
<i>Tange Panje</i>	1,4	1,6	1,8	3,8
<i>Patave</i>	1,5	1,7	1,8	3,8

Таблица 2.4 –Среднее значение колебания температуры будущего климата относительно настоящего времени для бассейна р. Сефидруд(С°)

Пункт	РТК2,6		РТК8,5	
	с 2020 по 2049	с 2050 по 2079	с 2020 по 2049	с 2050 по 2079
<i>Myane- Share chi</i>	1,4	1,6	1,8	3,6
<i>Gilave</i>	1,4	1,6	1,8	3,6
<i>Octor</i>	1,3	1,6	1,8	3,6
<i>Nesare Oliya</i>	1,4	1,7	1,9	3,9
<i>Myane Gharnggho</i>	1,2	1,5	1,7	3,5
<i>Salamat Abad</i>	1,4	1,7	1,9	3,9
<i>Sarcham</i>	1,4	1,7	1,8	3,7

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОГНОЗОВ СТОКА НА ОСНОВЕ УСЛОВНЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СТОКА РЕК

3.1 Долгосрочная оценка вероятностных характеристик речного стока Ирана

По методике, изложенной в главе 2, были сделаны долгосрочные прогнозы вероятностных характеристик рек Карун и Сефидруд по климатическим моделям *MPI-EFM-LR*, *BCC-CSMI* и *MPI-ESM-MR* сценариев 2,6 и 8,5. Напомним, что при параметризации математической модели величина интенсивности внешнего белого шума $G_{\tilde{N}}$ считается неизменной, постоянной. Сценарная оценка дается на периоды с 2020 по 2049 гг. (первый период) и с 2050 по 2079 гг. (второй период). В таблицах 3.1 и 3.2 представлены результаты расчетов. На рисунках В.1 – В.4 показано географическое распределение слоя стока и коэффициента вариации по территории бассейнов рек Карун и Сефидруд.

По данным карт видно, что слой стока для бассейна р. Карун с севера на юг увеличивается. Для бассейна р. Сефидруд для второго периода слой стока больше, чем для первого периода. Для изучения третьего момента рассматривается коэффициент асимметрии (C_s). Для бассейнов рек Карун и Сефидруд наименьшие значения встречаются для постов *BehshtAbad* и *MoterKhane*. На постах *Pole krakh bast* (кроме РТК 8,5 для периода с 2020 по 2049), *TangePanj (sezar)*, *Dashte bozorg* (кроме РТК 2,6 для периода с 2050 по 2079), *Barez* (только РТК 8,5 для периода с 2050 по 2079), *Solegan* (только РТК 2,6 для периода с 2020 по 49), *Gragoni- Ghezelozon*, *Mahneshan- Ghezelozon* ожидается увеличение значений C_s , на остальных постах значения C_s уменьшатся.

Таблица 3.1 – Значения параметров слоя стока для настоящего и будущего времени для бассейна р. Карун

Пункт	Фактические слои стока (с 1957 по 2005)			Прогнозные слои стока											
				РТК 2,6						РТК 8,5					
	h , мм	C_v	C_s	с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.			с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
				$h_{пр}$	C_v	C_s	$h_{пр}$	C_v	C_s	$h_{пр}$	C_v	C_s	$h_{пр}$	C_v	C_s
<i>Patave</i>	574	0,43	0,53	589	0,34	0,5	653	0,34	0,5	628	0,36	0,49	578	0,35	0,49
<i>Kata</i>	336	0,34	0,61	369	0,32	0,59	409	0,32	0,45	390	0,33	0,41	365	0,32	0,5
<i>Barez</i>	444	0,38	0,55	479	0,32	0,41	532	0,33	0,46	767	0,32	0,54	703	0,32	0,55
<i>Kohe Sokhte</i>	81	0,48	1,14	92	0,22	0,32	92	0,23	0,38	92	0,23	0,38	88	0,23	0,36
<i>Rahim Abad</i>	108	0,3	0,98	111	0,31	0,32	118	0,31	0,35	112	0,31	0,33	107	0,32	0,47
<i>Dorud</i>	180	0,4	0,9	186	0,29	0,21	196	0,29	0,25	187	0,3	0,22	180	0,3	0,43
<i>Solegan</i>	163	0,39	0,8	164	0,29	0,84	182	0,29	0,7	182	0,32	0,66	163	0,29	0,77
<i>Pole krakhsbast</i>	181	0,39	0,77	223	0,28	0,91	246	0,29	0,79	238	0,31	0,7	219	0,28	0,86
<i>Armand</i>	379	0,29	0,79	392	0,22	0,67	429	0,22	0,5	415	0,22	0,48	384	0,22	0,57
<i>Sepid dast (sezar)</i>	211	0,4	1,08	216	0,26	0,52	228	0,26	0,52	219	0,25	0,52	211	0,27	0,62
<i>Tange Panj (sezar)</i>	376	0,54	1,27	422	0,37	1,82	449	0,36	1,67	431	0,37	1,81	410	0,36	1,65
<i>Behsht Abad</i>	166	0,45	0,85	186	0,21	-0,14	205	0,21	-0,17	191	0,21	-0,08	183	0,22	-0,1
<i>Dashte bozorg</i>	134	0,48	0,96	139	0,51	1,02	159	0,49	0,81	151	0,51	1,0	136	0,63	1,7
<i>Tange Panj</i>	750	0,36	1,49	776	0,26	0,4	831	0,26	0,36	803	0,26	0,36	765	0,27	0,44

Таблица 3.2 – Значения параметров слоя стока для настоящего и будущего времени для бассейна р. Сефидруд

Пункт	Фактические слои стока (с 1957 по 2005)			Прогнозные слои стока											
				РТК 2,6						РТК 8,5					
	h , мм	C_v	C_s	с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.			с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
				$h_{пр}$	C_v	C_s	$h_{пр}$	C_v	C_s	$h_{пр}$	C_v	C_s	$h_{пр}$	C_v	C_s
<i>Binalud</i>	100	0,49	0,74	107	0,28	0,94	107	0,28	0,94	102	0,28	0,93	105	0,29	0,96
<i>Salamat Abad</i>	38	0,57	1,2	41	0,21	0,9	41	0,21	0,97	39,1	0,21	0,97	40	0,23	1,14
<i>Hashtad Joft</i>	68,2	0,59	1,27	84	0,31	0,38	81,2	0,31	0,35	79,3	0,31	0,34	81,4	0,31	0,38
<i>Gragoni-Ghezelozon</i>	52,6	0,52	0,90	59,4	0,22	1,37	59,2	0,22	1,44	56,5	0,22	1,43	58,9	0,23	1,42
<i>Iyanki Kand</i>	58,4	0,48	1,00	79	0,24	0,44	80,5	0,24	0,41	77,1	0,24	0,39	81	0,24	0,43
<i>Sarcham</i>	31,2	0,67	0,80	36,5	0,25	0,52	37,5	0,26	0,42	35,9	0,26	0,43	36,4	0,26	0,5
<i>Pole Dokhtar</i>	49	0,52	0,79	56,1	0,22	0,77	56,5	0,23	0,82	54,4	0,22	0,76	56,3	0,23	0,86
<i>Moter Khane</i>	94,1	0,58	0,95	107	0,3	0,12	111	0,3	0,12	104	0,3	0,12	106	0,3	0,12
<i>Ostor</i>	63,2	0,51	1,12	69,7	0,21	0,67	71,8	0,21	0,66	68,4	0,21	0,59	70,6	0,21	0,69
<i>Gilave</i>	67	0,53	1,56	74,7	0,21	0,53	79,5	0,22	0,5	74,7	0,22	0,46	76,6	0,22	0,54
<i>Myane (shahre Chai)</i>	96,3	0,5	0,68	103	0,23	0,34	107,2	0,23	0,29	100	0,23	0,23	103,1	0,23	0,25
<i>Myane-Granko</i>	137	0,43	0,49	150	0,26	0,48	155	0,27	0,46	142	0,28	0,51	148	0,28	0,47
<i>Mahneshan</i>	53,3	0,5	0,8	60,3	0,21	0,9	59,6	0,22	0,94	57,1	0,21	0,93	59,3	0,22	1,03
<i>Shadi Abad</i>	18,6	0,62	1,25	22	0,2	0,44	22,1	0,19	0,47	21,4	0,19	0,41	20,8	0,21	0,59

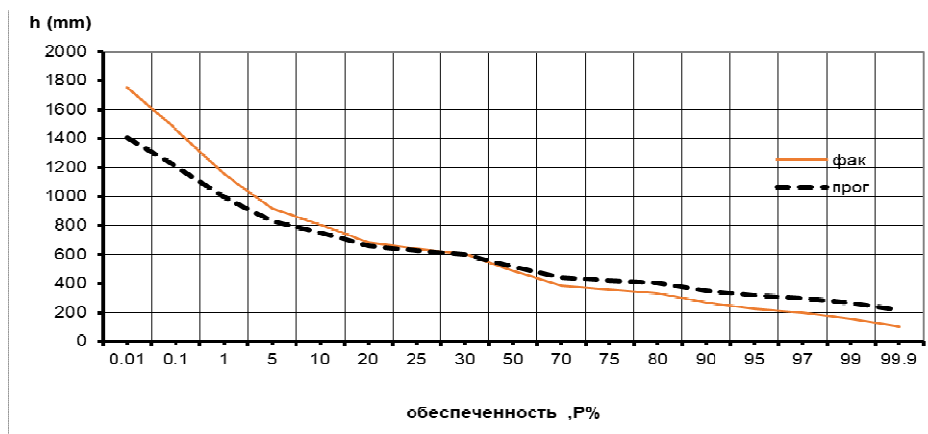
Для исследования изменений второго момента изучается коэффициент вариации (C_v). Для бассейна р. Карун для поста *Kohe Sokhte Behsht Abad* ожидается самое большое изменение. Для бассейна р. Сефидруд изменения коэффициента вариации ожидаются более, чем на 42 %, кроме поста *Myane-Granko*.

Были построены аналитические кривые обеспеченности Пирсона III типа для настоящего климата и будущего (для примера см. рисунок 3.1), сравнивались обеспеченные значения 0,1, 1, 10 %. Результаты сравнения обеспеченных значений представлены в таблицах 3.3 и 3.4. Для постов *Kata, Tange Panj* (находятся в бассейне р. Карун) изменения слоя стока меньше чем 10 %, поэтому кривая обеспеченности останется неизменной. В бассейне р. Карун заметные изменения наблюдаются на постах *Kohe Sokhte, Sepiddast (sezar)* и *Behsht Abad*. В бассейне р. Сефидруд изменения затронут практически все посты кроме *Binalud, Gragoni-Ghezelozone, Iyanki Kand, Myane-Granko*. В общем можно сказать, что у бассейнов рек Карун и Сефидруд повышение слоя стока ожидается на постах *Kohe Sokhte, Barez* и *Dashte bozorg*, для других постов слой стока или уменьшится, или останется неизменным.

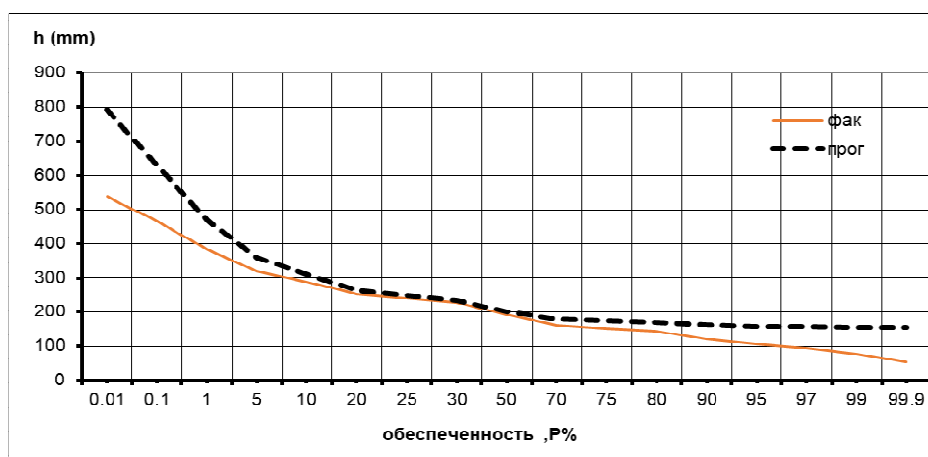
В таблицах В.1 и В.2 показаны относительные отклонения сценарных значений статистических характеристик от фактических. В таблице периоды обозначены следующим образом: I – с 2020 по 2049, II – с 2050 по 2079.

Были построены гистограммы, которые показаны на рисунках В.5 – В.8, для того, чтобы лучше проиллюстрировать различия относительных отклонений сценарных значений статистических характеристик от фактических.

а)



б)



в)

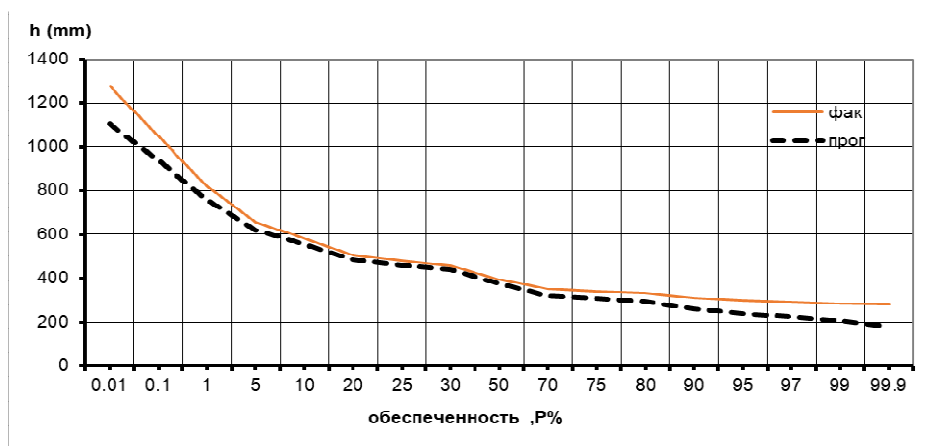


Рисунок 3.1 – Примеры фактических и прогнозных кривых обеспеченностей (посты *Patave* (а), *Sepid Dashte Sezar* (б) и *Kata*(в))

Таблица 3.3 – Обеспеченные величины слоя стока бассейна р. Карун для современных и сценарных климатических условий

Пункт	Факт. слой стока (1957–2005)			Прогнозные слои стока											
				РТК 2,6						РТК 8,5					
				с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.			с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$
<i>Patave</i>	1499	1229	902	1322	1114	856	1469	1237	950	1429	1203	922	1294	1092	841
<i>Kata</i>	796	655	490	837	695	527	855	734	579	808	699	555	791	670	520
<i>Barez</i>	1077	890	665	976	846	675	1140	973	761	1683	1415	1090	1554	1303	1000
<i>Kohe Sokhte</i>	267	203	134	159	141	118	160	143	119	160	143	119	155	138	115
<i>Rahim Abad</i>	253	205	151	224	194	155	238	207	166	226	196	157	225	193	152
<i>Dorud</i>	494	392	276	369	320	257	389	337	271	375	324	260	363	314	251
<i>Solegan</i>	433	347	248	365	301	227	394	328	251	416	344	259	362	299	226
<i>Pole krakhsbast</i>	476	383	275	496	407	307	534	443	337	537	444	336	486	400	302
<i>Armand</i>	842	695	526	740	632	506	766	670	552	742	651	536	710	613	496
<i>Sepid dast (sezar)</i>	604	471	325	419	361	289	442	380	304	422	363	292	440	370	287
<i>Tange Panj (sezar)</i>	1364	1018	646	1298	965	626	1334	1005	664	1327	986	640	1219	919	608
<i>Behsht Abad</i>	489	385	267	297	271	235	328	300	260	302	273	233	297	270	233
<i>Dashte bozorg</i>	425	329	221	461	353	233	486	382	262	498	382	254	611	434	251
<i>Tange Panj</i>	2147	1641	1108	1426	1259	1035	1546	1360	1114	1498	1317	1079	1454	1268	1029

Таблица 3.4 – Обеспеченные величины слоя стока с бассейна р. Сефидруд для современных и сценарных климатических условий

Пункт	Факт. слой стока (1957-2005)			Прогнозные слои стока											
				РТК 2,6						РТК 8,5					
				с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.			с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$
<i>Binalud</i>	306	242	167	241	197	148	241	197	148	230	188	141	238	194	144
<i>Salamat Abad</i>	142	106	67	78	66	52	79	66	52	76	64	50	83	68	52
<i>Hashtad Joft</i>	266	197	122	168	146	117	163	141	113	159	138	111	162	141	114
<i>Gragoni-Ghezelozone</i>	173	134	89	124	101	77	127	103	77	120	97	73	129	103	77
<i>Iyanki Kand</i>	185	143	96	142	125	103	145	128	106	137	122	101	147	129	107
<i>Sarcham</i>	120	91	59	70	61	49	69	60	49	67	58	48	71	61	49
<i>Pole Dokhtar</i>	156	122	83	108	91	73	111	93	74	105	89	71	112	94	73
<i>Moter Khane</i>	339	258	168	211	184	149	218	191	154	204	178	143	208	182	147
<i>Ostor</i>	214	163	106	128	110	89	133	114	92	116	103	87	131	113	90
<i>Gilave</i>	254	186	114	134	117	96	141	124	102	130	115	95	139	121	99
<i>Myane (shahre Chai)</i>	292	231	160	182	161	134	190	168	140	179	158	131	184	162	134
<i>Myane-Granko</i>	347	288	214	289	251	202	298	259	209	285	244	193	291	252	202
<i>Mahneshan-Ghezelozone</i>	166	130	89	277	191	94	117	98	77	111	93	73	119	99	77
<i>Shadi Abad-Cheshme shor</i>	75	55	34	37	33	28	37	33	28	34	31	27	36	32	27

3.2 Оценка устойчивости прогнозных карт

Оценка устойчивости прогнозных карт для первого периода (с 2020 по 2049 гг.) и второго периода (с 2050 по 2079 гг.) оценивалась по формуле:

$$\beta_{\text{пр}} = 2k_{\text{пр}} \ln r_{\text{пр}} + 2 \quad (3.2)$$

где, $k_{\text{пр}}$ – прогнозный коэффициент стока;

$r_{\text{пр}}$ – прогнозный коэффициент автокорреляции.

Значения критерия устойчивости начальных моментов показаны в таблицах В.3 и В.4. Закартированные значения представлены на рисунках В.9 и В.10. Видно, что 6 постов из бассейна р. Карун (у поста *Dashte bozorg* только для второго периода) имеет значение $\beta_{\text{пр}}$ больше 0,67 и 10 постов из бассейна р. Сефидруд значение $\beta_{\text{пр}}$ больше чем 0,67. Это означает, что для будущего климата третий момент будет неустойчивым.

Для прогнозирования коэффициента автокорреляции найдено отношение между слоями стока и коэффициентами автокорреляции $r(1)$ по фактическим данным (рисунок В.11(в приложении В)).

3.3 Долгосрочная оценка вероятностных характеристик испарения Ирана

Метод водного баланса

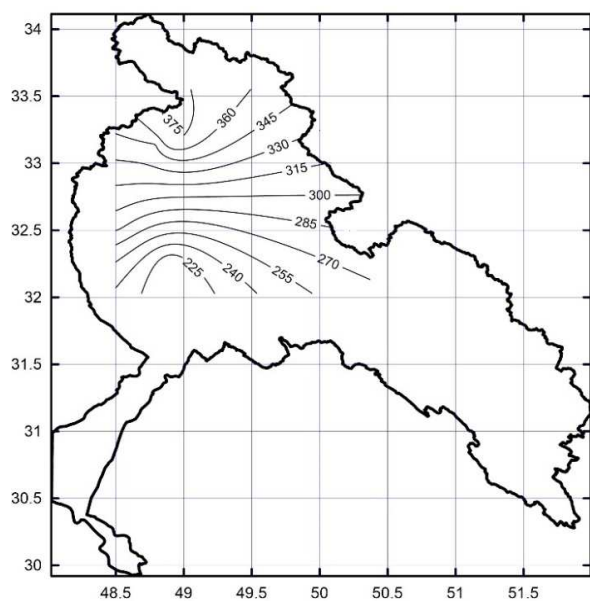
Для гидрологических постов таблиц В.4 и В.5 вычислено значение испарения по методу водного баланса. Карты 3.2 и 3.3 показывают распределе-

ние среднего летнего испарения и в таблицах 3.5 и 3.6 вычислены изменения значений испарения и его коэффициентов дисперсии асимметрии.

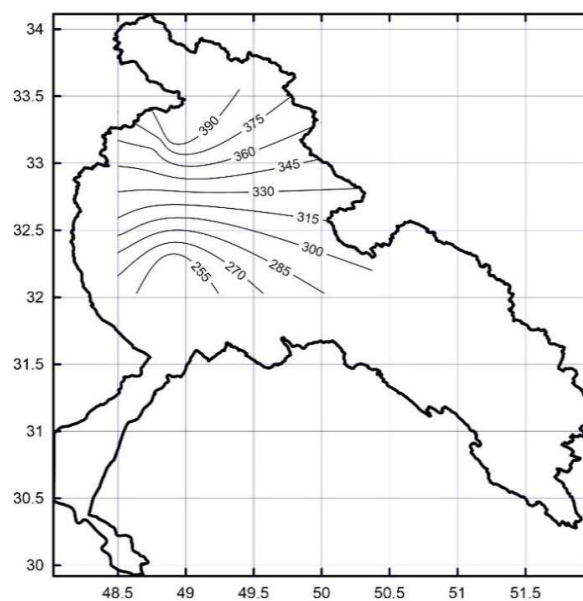
Изменения обеспеченных значений испарения на постах *Rahim Abad*, *Behsht Abad* и *Dorud* (кроме РТК 2,6 период с 2050 по 2079 гг.), находящихся в бассейне р. Карун меньше чем 10 %. Можно отметить, что вероятностные характеристики испарения не будут изменяться, так как изменения находятся в пределах погрешности. Наибольшие измерения испарения и коэффициента асимметрии наблюдаются в гидрологическом посту *Tange Pang Sezar*.

В бассейне р. Сефидруд на постах *Binalud*, *Motor Khane*, *Shadi Abad* и *Gilave* (кроме РТК 8,5 период с 2050 по 2079 гг.) изменения обеспеченных значений испарения меньше чем 10 %. Коэффициент асимметрии за исключением *Gilave* является неизменным или отрицательным. На рисунках В.12–В.15 представлены заактивированные значения различий.

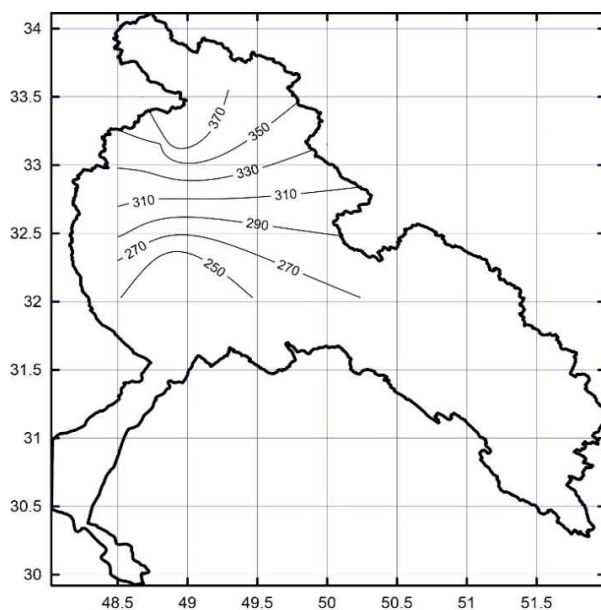
а)



б)



в)



г)

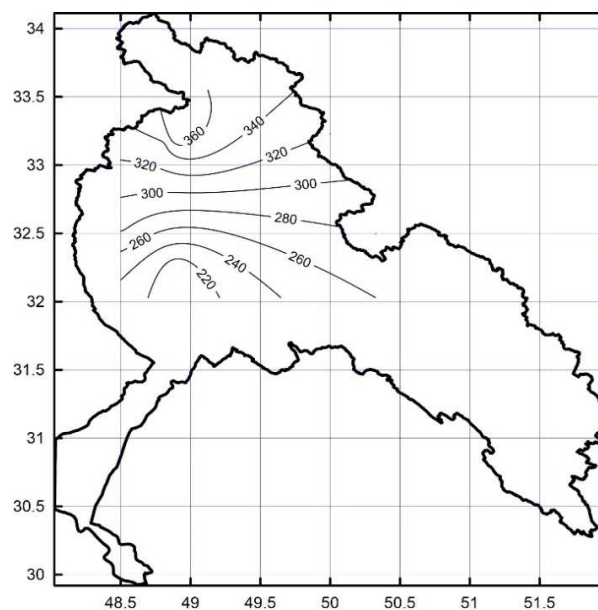


Рисунок 3.2 – Распределение сценарного испарения по бассейну р. Карун:

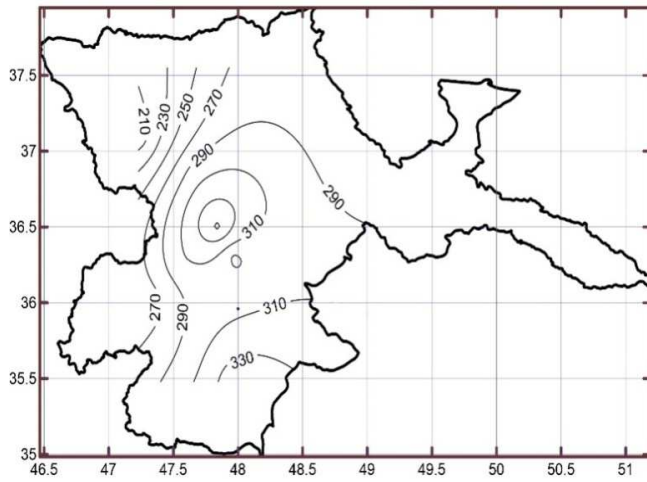
а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;

б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;

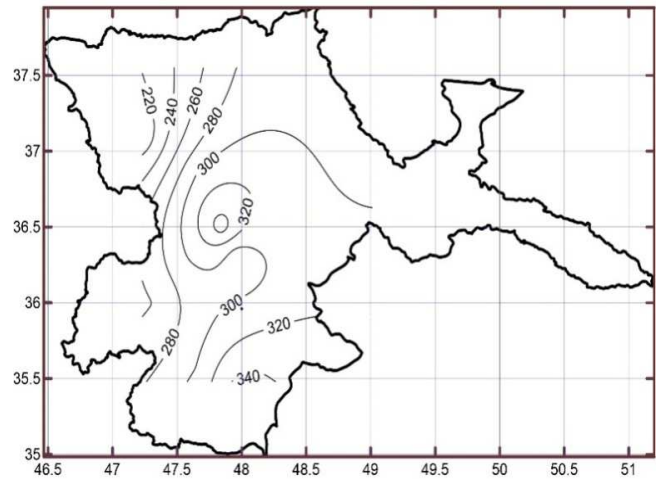
в – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;

г – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

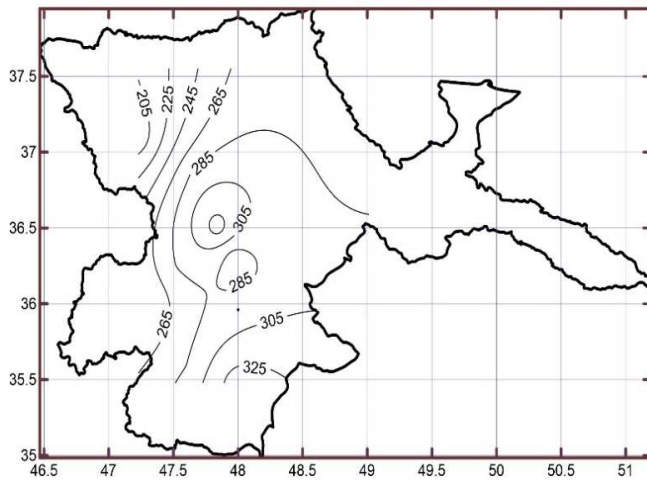
а)



б)



в)



г)

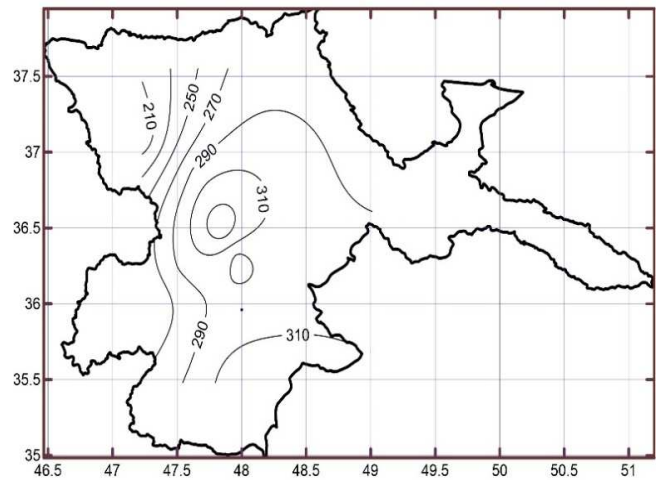


Рисунок 3.3 – Распределение сценарного испарения по бассейну р. Сефидруд:

а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;

б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;

в – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;

г – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

Таблица 3.5 – Относительные отклонения сценарных значений статистических величин испарения от фактических для бассейна р. Карун

Пост	Климатический сценарий	Период	ΔE , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %	Пост	Климатический сценарий	Период	ΔE , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %
			0.1	1	10						0.1	1	10		
<i>Rahim Abad</i>	РТК 2,6	I	-2	0	2	-14	112	<i>Tange Panj (sezar)</i>	РТК 2,6	I	48	27	6	-25	1112
		II	6	7	9	-15	134			II	53	32	12	-27	1026
	РТК 8,5	I	0	1	3	-14	120		РТК 8,5	I	51	30	8	-25	1101
		II	0	0	0	-11	215			II	39	21	3	-26	1013
<i>Dorud</i>	РТК 2,6	I	7	5	5	-21	286	<i>Behsht Abad</i>	РТК 2,6	I	-4	-2	1	-29	40
		II	12	11	11	-21	323			II	7	8	11	-27	30
	РТК 8,5	I	8	6	6	-20	301		РТК 8,5	I	1	1	4	-28	66
		II	5	3	3	-18	493			II	-4	-3	0	-25	43
<i>Sepid dast (sezar)</i>	РТК 2,6	I	15	13	11	-8	419	<i>Dashte bozorg</i>	РТК 2,6	I	26	16	5	-14	138
		II	21	19	17	-8	422			II	33	26	18	-17	90
	РТК 8,5	I	16	14	12	-10	423		РТК 8,5	I	36	26	14	-14	132
		II	21	16	10	-3	518			II	67	43	13	8	297

Таблица 3.6 – Относительные отклонения сценарных значений статистических величин испарения от фактических для бассейна р. Сефидруд

Пост	Климатический сценарий	Период	ΔE , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %	Пост	Климатический сценарий	Период	ΔE , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %
			0,1	1	10						0,1	1	10		
<i>Binalud</i>	РТК 2,6	I	8	11	16	-17	-7	<i>Moter Khane</i>	РТК 2,6	I	-8	-5	1	-31	-52
		II	8	11	16	-17	-7			II	-5	-2	4	-31	-52
	РТК 8,5	I	3	6	11	-17	-9		РТК 8,5	I	-11	-8	-2	-31	-52
		II	6	9	13	-16	-6			II	-9	-6	0	-31	-52
<i>Hashtad Joft</i>	РТК 2,6	I	15	16	16	2	7	<i>Ostor</i>	РТК 2,6	I	19	17	15	9	10
		II	12	12	12	2	0			II	23	22	19	11	7
	РТК 8,5	I	10	9	9	2	-1		РТК 8,5	I	8	10	12	9	-4
		II	12	12	12	2	7			II	22	20	17	11	11
<i>Salamat Abad</i>	РТК 2,6	I	26	20	14	-2	99	<i>Gilave</i>	РТК 2,6	I	9	9	9	12	-16
		II	27	20	13	1	113			II	15	16	16	14	-20
	РТК 8,5	I	23	17	9	1	112		РТК 8,5	I	6	8	9	14	-28
		II	32	23	13	9	150			II	13	13	12	15	-15
<i>Gragoni-Ghezelozon</i>	РТК 2,6	I	20	18	15	8	11	<i>Shadi Abad-Cheshmeshor</i>	РТК 2,6	I	8	7	7	4	47
		II	23	20	16	11	16			II	8	7	7	2	47
	РТК 8,5	I	16	14	10	10	15		РТК 8,5	I	2	2	3	-1	32
		II	25	21	16	14	21			II	13	8	3	11	99
<i>Pole Dokhtar</i>	РТК 2,6	I	19	17	16	5	8			I					
		II	21	20	17	7	12			II					
	РТК 8,5	I	15	14	12	6	5			I					
		II	22	20	17	8	20			II					

4 ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ ИРАНА НА ОСНОВЕ УСЛОВНЫХ ВЕЯТНОСТЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СТОКА РЕК

Метод РГГМУ

В данной части исследования для долгосрочной оценки вероятностного распределения испарения будет использована методика, разработанная в РГГМУ и применяемая для оценки вероятностных распределений речного стока в новых ожидаемых климатических условиях. Правомерность использования этой методики уже доказана для различных водосборов Земли, находящихся в различных физико-географических условиях (см., например, [15]).

Расчетная система имеет вид:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0; \\ -\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\tilde{N}} &= 0, \end{aligned} \tag{4.1}$$

где, $\bar{c} = 1/k_E\tau$; $\bar{N} = \bar{X}/\tau$;

k_E – коэффициент испарения;

τ – время релаксации речного бассейна [для многолетнего испарения (или стока) $\tau = 1$ год];

$G_{\tilde{N}}$ – интенсивность внешнего шума;

$\bar{X}$ – интенсивность осадков;

m_1, m_2 – первый и второй момент соответственно.

4.1 Совместное вероятностное распределение речного стока и испарения

Как показали полученные результаты в главах 2 и 3, статистические моменты вероятностных распределений многолетних видов речного стока могут быть неустойчивыми. Имеется в виду неустойчивость решения модели формирования стока в виде системы уравнений для начальных моментов $m_n(n = \overline{1, 4})$:

$$\begin{aligned} dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где, $c = 1/(k\tau) = \bar{c} + \tilde{c}$; $\bar{N} = \bar{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$;

$\bar{c}$ и $\bar{N}$ – математические ожидания;

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

k – коэффициент стока;

τ – время релаксации бассейна.

Из системы (4.2) видно, что при $\bar{c} < 0,5nG_{\tilde{c}}$ производная $dm_n/dt > 0$, т. е. $m_n \rightarrow \infty$. А это и есть формальный признак неустойчивости. Неустойчивость β можно оценить соотношением $G_{\tilde{c}}/\bar{c}$. Неустойчивость – показатель того, что в бассейнах формируются сток по схеме не следующей из уравнения Пирсона [23].

Для преодоления возникшей проблемы в РГГМУ был разработан подход частично инфинитного моделирования [22, 24, 28, 29, 34]:

«Неустойчивость рассматривается как атрибут процессов развития, а так как развитие системы означает появление (зарождение) у нее новых свойств (фазовых переменных), то включение в модель формирования стока новых переменных (наряду с расходом воды) уменьшает мультипликативный шум за счет частичного перераспределения внешнего воздействия на внутреннюю реакцию бассейна.» Вместо одно мерного уравнения ФПК применяют n -мерное:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial(A_i p)}{\partial Y_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2(B_{ij} p)}{\partial Y_i \partial Y_j}, \quad (4.3)$$

где, p – плотность вероятности;

$\vec{Y} = (Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_n)$ вектор состояния;

A_i, B_{ij} – коэффициенты сноса и диффузии.

При двух фазовых переменных решением этого уравнения является нормальное распределение («колокольчик») (рисунок 4.1, а) [31].

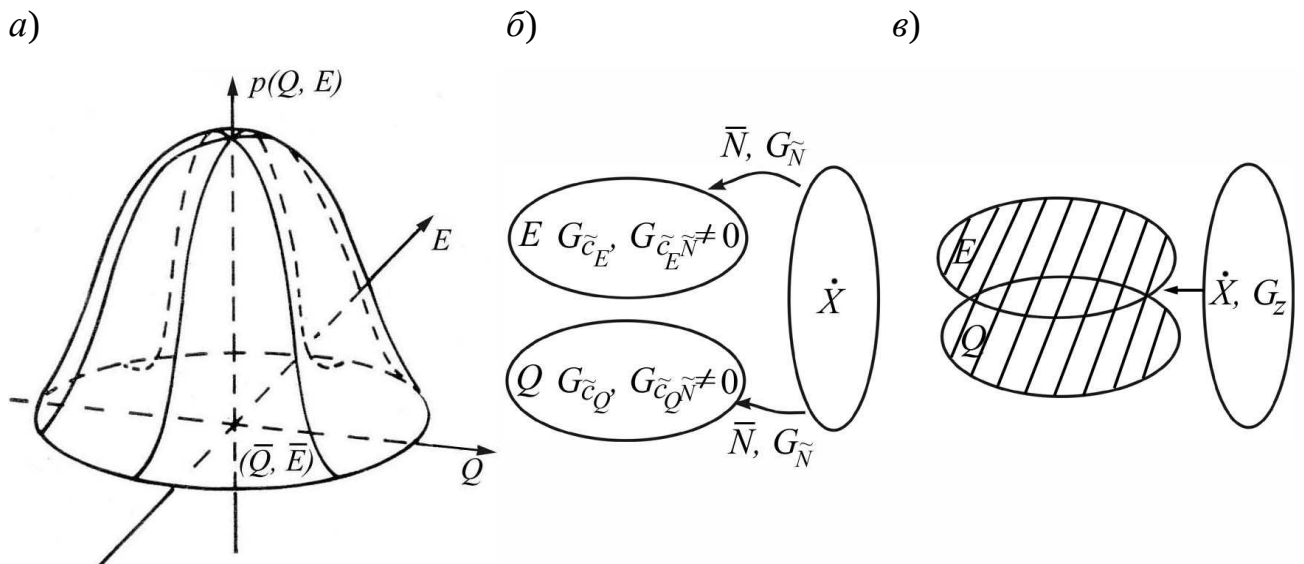


Рисунок 4.1 – Нормализация распределения $p(Q, E)$ при объединении двух предметных областей (а) и учитываемые интенсивности шумов при раздельном (б) и совместном (в) их рассмотрении.

В случае одномерного распределения необходимо иметь три момента для его описания (в случае кривой Пирсона III типа). Сечение двумерного распределения будет нормальным, и для его описания надо знать два момента. Но это будет условное распределение (для каждого E – «свое»). Устойчивость моментов в расширенной (за счет включения в уравнение испарения) модели ФПК (4.3) будет в случае сжимаемости частично инфинитное среды для двумерного распределения:

$$\text{div}\vec{A} = \sum \partial A_i / \partial Q_i = -(\bar{c}_Q - 0,5 G_{\bar{c}_Q}) - (\bar{c}_E - 0,5 G_{\bar{c}_E}) < 0, \quad (4.4)$$

где, $\bar{c}_E$ и $G_{\bar{c}_E}$ – математическое ожидание и интенсивность шума мультипликативной составляющей модели испарения.

Из выражения (4.4) следует, что учет дополнительной фазовой переменной в виде испарения увеличивает шансы на «сжимаемость». Чтобы проверить это утверждение (см. [36, 33, 60]) выражение (4.4) было приведено к виду (с учетом того, что $\beta = G_{\bar{c}} / \bar{c}$):

$$\text{div}\vec{A} = -\bar{c}_Q(1 - 0,5\beta_Q) - \bar{c}_E(1 - 0,5\beta_E). \quad (4.5)$$

Например, результаты вычисления β_Q и β_E для ЕТР показали, что β_Q уменьшается с юга на север ($\beta_Q = 1,93$, р. Кума – ст-ца Александрийская, 44°с.ш.; $\beta_Q = 0,25$, р. Пеза – д. Игумново, 66 °с.ш.), а β_E – увеличивается (для тех же бассейнов – с 0 до 0,87) [31]. Таким образом, каждая из переменных (Q и E) стабилизирует другую (тем в большей степени, чем неустойчивая последняя), т. е. действует компенсационный механизм, обеспечивающий статистическую устойчивость совместных распределений стока и испарения.

По имеющимся совместным рядам слоя стока и испарения строились эмпирические двумерные гистограммы (примеры см. рисунок 4.2) [31].

Наличие эмпирических двумерных гистограмм создает возможности для разработки различных двумерных вариантов уравнения (4.3) и способов их решения [27, 36, 33].

Многомерные распределения имеют широкую область применения в теоретической гидрологии, но в проектной практике их использование для задания расходов требуемой обеспеченности затруднительно, так как такого опыта у проектировщиков нет. Ниже описан возможный полиатив по использованию распределений $p(Q, E)$ для получения одномерных кривых обеспеченности с более устойчивыми статистическими моментами.

Идея заключается в переходе от безусловных распределений $p(Q)$ (или $P(Q)$) к условным, в которых условием служит информация об испарении, получаемая из двумерных распределений $p(Q, E)$. На эллипсах рассеивания (пример на рисунке 4.3) выбирается диапазон ΔE , включающие в себя значение нормы испарения $\bar{E}$, и отсекается от

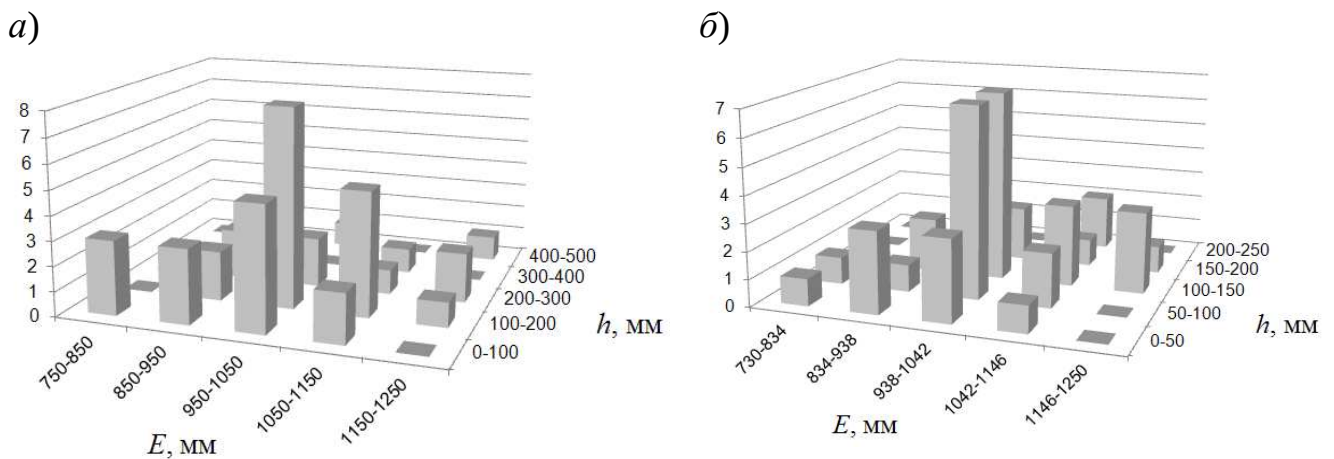


Рисунок 4.2 – Двумерные гистограммы *а* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Mont; *б* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval.

остального поля точек. При пяти столбцах гистограммы по оси испарения отсекаются крайние. По точкам, попавшим в диапазон ΔE , строятся условные кривые обеспеченности ($P(Q/\Delta E)$).

Происходит усечение ряда расходов воды за счет маловероятных значений расхода и испарения. Конечно погрешность определения нормы, коэффициентов вариации C_v и асимметрии C_s при этом увеличивается примерно на 30 % [32].

Тем не менее, применение условных распределений открывает возможность корректного прогнозирования в зонах с неустойчивым формированием стока. Пояснения можно найти в работе [32].

Эффект от применения условных распределений (по сравнению с неустойчивыми безусловными) достигается за счет того, что отбрасывают члены рядов с большими испарениями, уменьшают интенсивность мультипликативного шума $G_{\tilde{c}}$, оставляя неизменным параметр $\bar{c}$, т. е. увеличивают разность $(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})$.

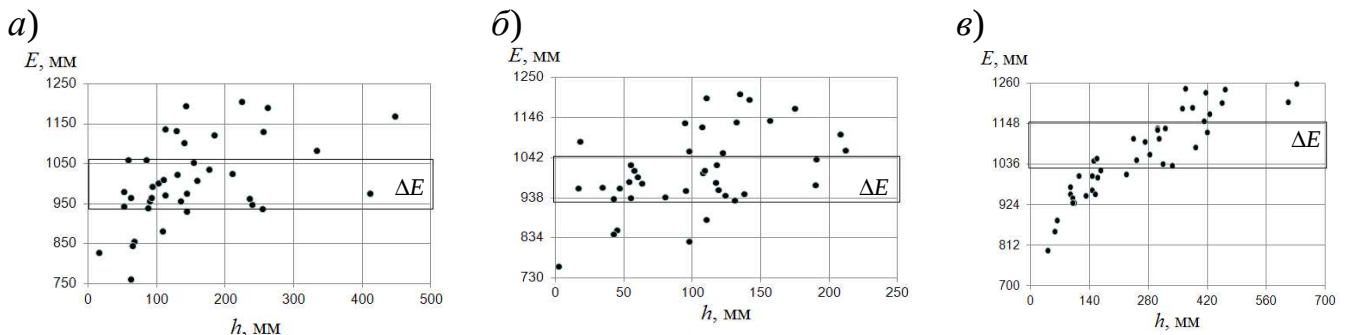
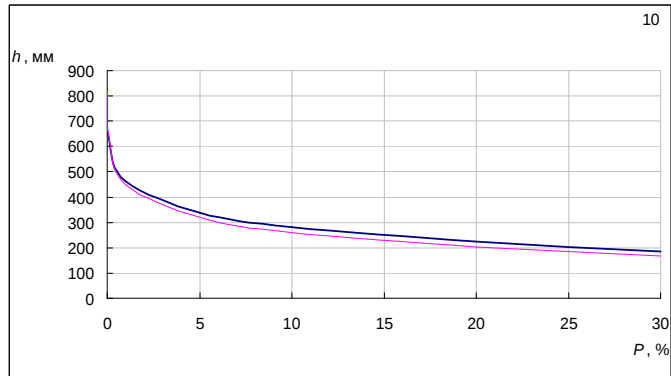


Рисунок 4.3. – Эллипсы рассеивания: *а* – р. Alibori – ст. RouteKandi- Banikoara Amont; *б* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval; *в* – р. Faleme – ст. Gourbassy [32].

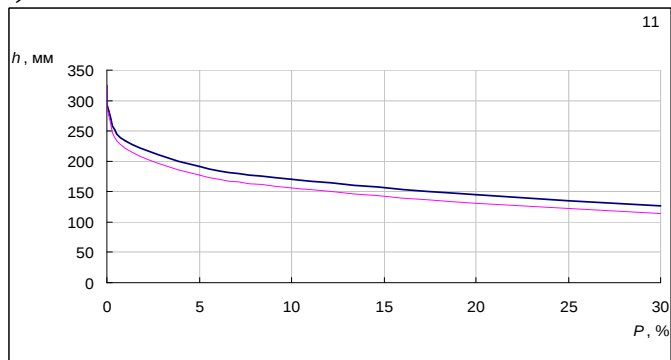
На рисунке 4.4 приведен пример, показывающий, что проэкстраполированный в зону малых обеспеченностей «хвост» условного распределения быстрее приближается к оси стока, чем безусловный [32]. Объективную картину скорости этого приближения дают результаты вычисления

слоя стока 0,1; 1; 10 %-ной обеспеченности по безусловным и условным распределениям: отклонения встречаются и минусовые, но в целом (среднем арифметическом) условные распределения имеют меньшие значения, причем тем меньше, чем меньше обеспеченность.

a)



б)



в)

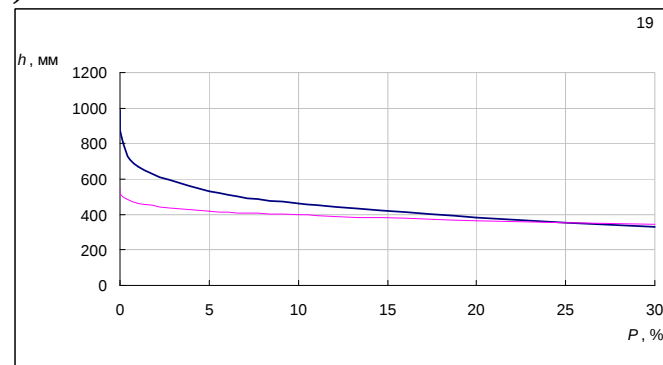


Рисунок 4.4 – Безусловные и условные кривые обеспеченностей: *a* – р. Alibori – ст. RouteKandi- Banikoara Amont; *б* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval; *в* – р. Faleme – ст. Gourbassy.

В данном исследовании условные распределения будут получены другим путем: работа будет вестись с теоретической поверхностью вероятности.

В таком случае, встает вопрос об аналитической аппроксимации эмпирических гистограмм, типа представленных на рисунке 4.5. В общем случае, аппроксимируют решение уравнения (4.3), для трехмерной плотности вероятности или даже более общее n -мерное, которое можно записать так [25, 26, 37]:

$$\partial p(\vec{x}, t) / \partial t = -\vec{\nabla}' [\vec{A}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t)] + 0,5 Sp [\vec{\nabla} \vec{\nabla}' \vec{B}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t)], \quad (4.6)$$

Где, $\vec{x}$ – вектор, характеризующий фазовые переменные исходной системы динамических моделей; $\vec{\nabla} = |\partial / \partial \vec{x}|$; штрих и Sp означают операции транспонирования и взятия следа.

Соотношение (4.6) является уравнением неразрывности $((\partial p(\vec{x}, t) / \partial t) = \text{div} \vec{\Pi}(\vec{x}, t))$ потока вероятности $\vec{\Pi}(\vec{x}, t) = \vec{A}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t) - 0,5 \text{div} \vec{B}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t)$, который для стационарного распределения

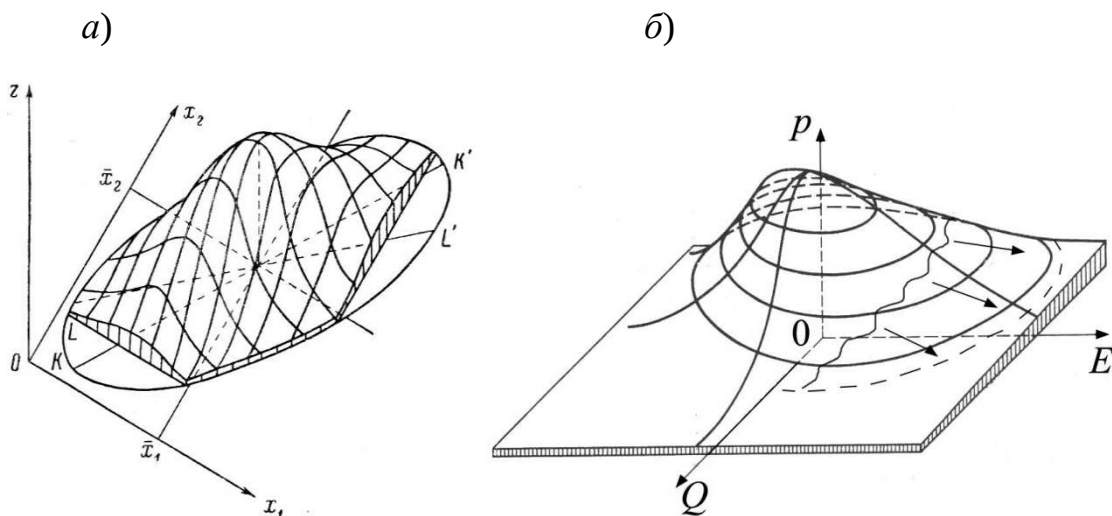


Рисунок 4.5 – Нормальная поверхность (а) и экстраполяция многомерного «хвоста» в зону малых обеспеченностей (б).

$(\partial p(\vec{x}, t)/\partial t) = 0$ является величиной постоянной, а учитывая, что на границах $p(\pm \infty, t) = 0$ – нулевой (на границах). Исходя из этого, получают искомое уравнение:

$$\vec{\nabla}[\vec{B}(\vec{x}, t)p(\vec{x}, t)] - 2\vec{A}(\vec{x}, t)p(\vec{x}, t) = 0. \quad (4.7)$$

Уравнениями в частных производных первого порядка, подобными (4.7), описываются всевозможные поверхности. При отсутствии параметрических шумов их решением является n -мерное нормальное распределение (рисунок 4.5, а), эллипсоид рассеяния которого позволяет определять вероятность нахождения вектора $\vec{x}$ внутри него.

В двумерном случае ($\vec{x} = (Q - E)$),

$$p(\vec{x}) = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_E\sqrt{1-r_{QE}^2}} \exp(-\lambda^2)$$

Вероятность попадания вектора $\vec{x}$ внутрь эллипса равных вероятностей равна $1 - e^{-\lambda^2}$, где

$$\frac{1}{2(1-r_{QE}^2)} \left[\frac{(Q-\bar{Q})^2}{\sigma_Q^2} - \frac{2r_{QE}(Q-\bar{Q})(E-\bar{E})}{\sigma_Q\sigma_E} + \frac{(E-\bar{E})^2}{\sigma_E^2} \right] = \lambda^2.$$

«В случае явного учета параметрических шумов решение уравнения (4.7) будет асимметричным (рисунок 4.5, б), и нужны определенные усилия, чтобы в полном виде проанализировать двумерный аналог уравнения Пирсона. Если ограничиться эмпирическими построениями, то первым шагом на пути перехода от нормальных многомерных распределений к асимметричным может быть использование так называемых распределе-

ний типа А, основанных на использовании ряда Грама-Шарлье, приводящего (в одномерном случае) к выражению:

$$p_A(x) = p(x) + \frac{r_3}{6} p^{(3)}(x) + \frac{r_4 - 3}{24} p^{(4)}(x), \quad (4.8)$$

где, x – нормированная случайная величина;

r_3, r_4 – основные моменты ($r_3 = \mu_3/\sigma^3, r_4 = \mu_4/\sigma^4$).» [25].

Первый член $p(x)$ разложения (4.8) дает нормальное распределение, которое деформируется за счет учета асимметрии и эксцесса (последующие члены в ряду (4.8)). Распределение (4.8) обобщается на двумерный случай [25]:

$$\begin{aligned} p_A(x, y) = & p(x) \left[p(y) - \frac{r_{0|3}}{6} p^{(3)}(y) + \frac{r_{0|4} - 3}{24} p^{(4)}(y) \right] + \\ & + p'(x) \left[-\frac{r_{1|2}}{2} p''(y) + \frac{r_{1|3} - 3r_{1|1}}{6} p^{(3)}(y) \right] + \\ & + p''(x) \left[-\frac{r_{2|1}}{6} p'(y) + \frac{r_{2|2} - 2r_{1|1}^2 - 1}{4} p''(y) \right] + \\ & + p^{(3)}(x) \left[-\frac{r_{3|0}}{6} p(y) + \frac{r_{3|1} - 3r_{1|1} - 1}{6} p'(y) \right] + p^{(4)}(x) \left[-\frac{r_{4|0} - 3}{24} p(y) \right] \end{aligned}$$

(здесь $r_{1|2}$ и т. д. – смешанные основные моменты), приводящий к асимметричному распределению типа, изображенного на рисунке 4.5, б.

Были вычислены модули 10 %-ной обеспеченности по безусловным и условным распределениям [25]. Последние – при значениях испарения, соответствующих расходам $\max_E Q$, определенных по двумерному нормальному распределению. Получено, что для зон с устойчивой и неустойчивой дисперсиями результаты различны. Если в первом случае среднее

отклонение $\delta_{\text{ср}}$, вычисленное по безусловному ($Q_{10\%}$) и условному ($Q_{10\%}^{\text{усл}}$) распределениям ($\delta = (Q_{10\%}^{\text{усл}} - Q_{10\%})/Q_{10\%}$), не превосходит 2 % (при максимальном отклонении 3,7 %), то во втором случае оно почти на порядок больше.

Аналогичные расчеты для меньших обеспеченностей (1 %; 0,1 %; 0,01 % – это «стандартные» значения, для которых составляются таблицы) показали, что для обеих зон практически всегда $\delta \% > 0$, т. е. $Q_{P\%}^{\text{усл}} > Q_{P\%}$. Значения $\delta_{\text{ср}}$ составляют 1–2 % (при максимальных отклонениях 5 %).

Подобные результаты можно объяснить тем, что, с одной стороны, условные распределения сдвинуты вправо по сравнению с безусловными, а с другой – их дисперсии меньше (хвосты более прижаты к оси расходов или модулей). Результат варьирует в зависимости от соотношения между σ_Q , σ_E и r_{QE} .

В данном исследовании были использованы следующие формулы:

$$\text{а) } p(\vec{x}) = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_E\sqrt{1-r_{QE}^2}} \exp(-\lambda^2);$$

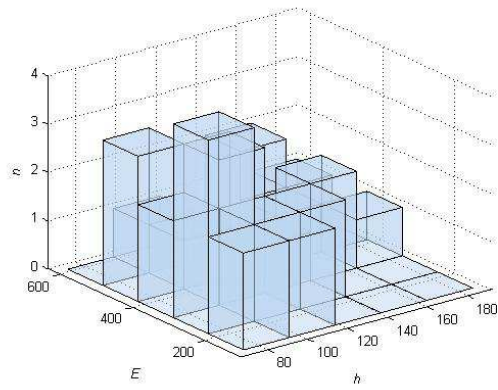
$$\text{б) } \lambda^2 = \frac{1}{2(1-r_{QE}^2)} \left[\frac{(Q - \bar{Q})^2}{\sigma_Q^2} - \frac{2r_{QE}(Q - \bar{Q})(E - \bar{E})}{\sigma_Q\sigma_E} + \frac{(E - \bar{E})^2}{\sigma_E^2} \right].$$

По рядам расходов воды и испарения рассчитывались: коэффициенты вариации (C_v), асимметрии (C_s), среднеквадратическое отклонение (ско) расхода и испарений, а так же коэффициент корреляции между рядами стока и испарения, для каждого поста. По этим данным строились точечные зависимости расхода от испарения $Q = f(E)$ – эллипсы рассеивания.

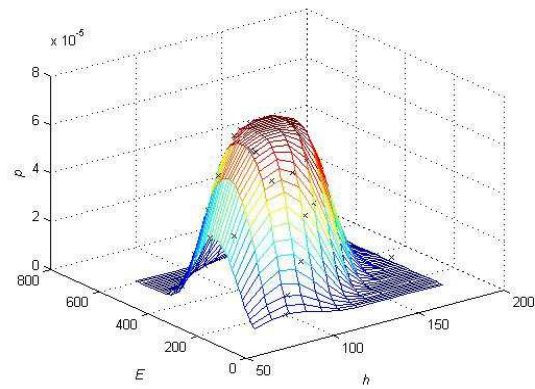
Пример эмпирической гистограммы и эллипса рассеивания, а также поверхности вероятности показан на рисунке 4.6 (Приложение Г).

а)

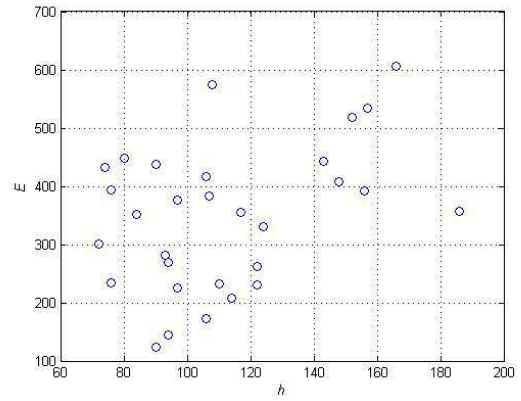
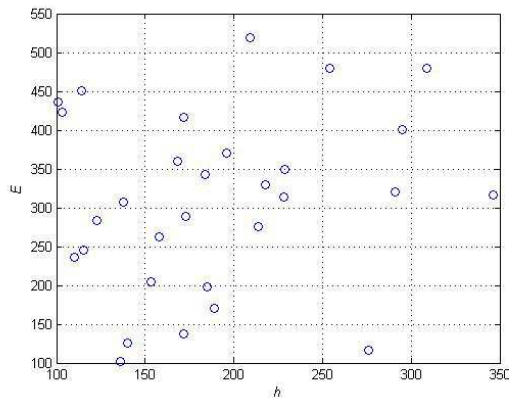
б)



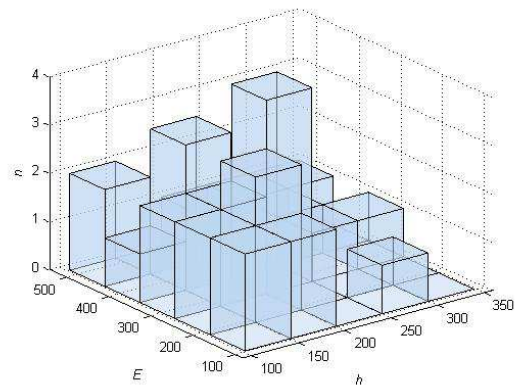
в)



д)



г)



ж)

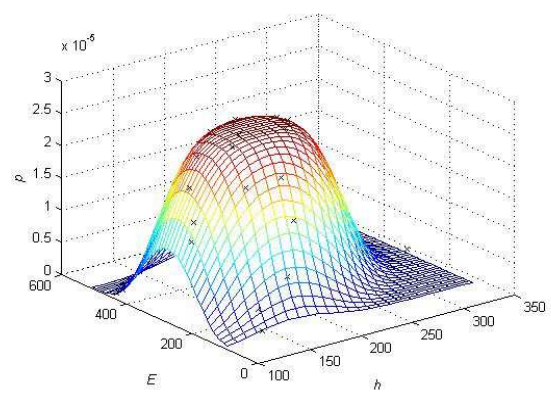
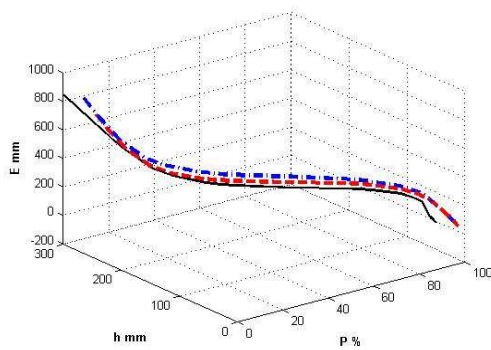


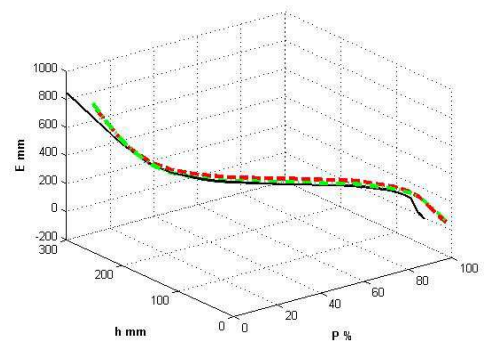
Рисунок 4.6 – Пост *Rahim Abad*: а – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности; пост *Dorud Tire*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности.

В строительном проектировании используются кривые обеспеченности расхода и испарения, которые в рамках семейства распределений Пирсона строятся по первым трем моментам, а точнее расчетным характеристикам: норме, коэффициентам вариации и асимметрии. Совместное визуальное представление этих кривых обеспеченности можно осуществить используя одномерные многообразия в трехмерном пространстве (обеспеченность P , испарение E , сток Q). На рисунке 4.7 представлен примеры подобных многообразий для речных бассейнов Ирана (Приложение 3).

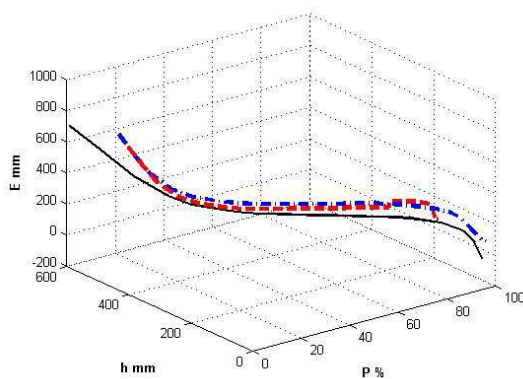
а)



б)



в)



г)

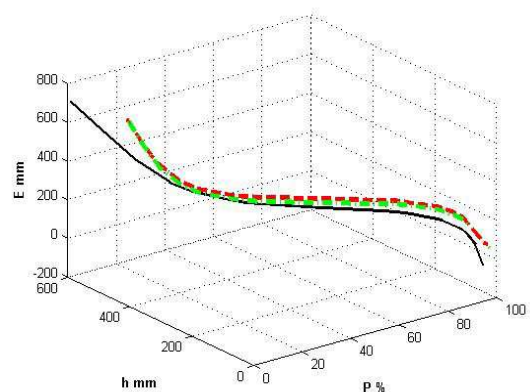


Рисунок 4.7 – Трехмерные кривые обеспеченности: а – *Rahim Abad* (РТК 2,6), б – *Rahim Abad* (РТК 8,5), в – *Dorud* (РТК 2,6), г – *Dorud* (РТК 8,5).

На рисунках следующие обозначения: — фактическая кривая (с 1971 по 2000 гг.) ----- кривая для первого периода (с 2020 по 2049 гг.) -.-.-

кривая для второго периода (с 2050 по 2079 гг.). Для того чтобы дать прогноз вероятностной поверхности необходимо знание не только прогнозных статистически характеристик стока и испарения, но и коэффициента корреляции между ними.

Коэффициент корреляции вычислялся между наблюдаемыми данными стока и испарения для речных бассейнов, на которых были получены критерии β больше чем 0,67.

В таблице 4.1 показан коэффициент корреляция между наблюдаемыми рядами стока и испарения и коэффициент, полученный по формуле (4.9). На рисунке 4.8 показана графическая связь коэффициентов корреляции. Отклонения достигают больших значений, поэтому при сценарной оценке поверхности вероятностей коэффициент корреляции будет считаться постоянной величиной.

Корреляция между стоком и испарением оценивалась методом регрессии с использованием пакета анализа программы (*EXCEL*). Была подобрана оптимальная зависимость с $R^2=0,54$ и $R = 0,73$:

$$-1,5 \times 10^{-8}h^3 + 2,4 \times 10^{-7}E^3 - 5.6553 \quad (4.9)$$

Где, h – слой стока;

E – испарение.

Поскольку гидрологическим проектам нужны кривые обеспеченности и работать с трехмерной поверхностью трудно, то необходимо получить условную кривую обеспеченности из поверхности вероятности (Приложение В). Для этой цели на поверхности h , E и p , предполагая, что значение испарения является постоянной величиной и равняется среднему значению испарения, делается поперечное сечение и этого графики переходим к кривой обеспеченности. Получается двумерный график функция плотности вероятности. Потом от таблицы 4.2 и 4.3 показывают обеспеченные значения 0,1, 1, 10 %, а также на рисунке 4.9 для примера показана

ны кривые обеспеченности для бассейна р. Карун (остальные кривые находятся в Приложении Е).

Прогнозные поверхности плотности вероятности находятся в Приложении И.

Таблица 4.1 – Коэффициент корреляции между наблюдаемыми рядами стока и испарения

Пункт	По факт. данным	по формуле (4.9)	Отклонение, %
<i>Rahim Abad</i>	0,39	0,26	33
<i>Dorud Tire</i>	0,18	0,16	11
<i>Behsht Abad</i>	-0,48	0,19	140
<i>Sepid dash Sezar</i>	0,21	0,12	43
<i>Tange Panj e</i>	0,03	0,18	-500
<i>Dashte Bozorg</i>	0,5	0,05	90
<i>Patave</i>	-0,22	-0,19	14
<i>Barez</i>	0,26	0,13	50
<i>Kohe Sokhte</i>	0,2	0,32	-60
<i>Tange Panj e</i>	-0,27	-0,46	-70
<i>Solegan</i>	0,59	0,74	-25
<i>Pole Krakhbast</i>	0,69	0,48	30
<i>Kata</i>	0,27	0,15	44
<i>Armand</i>	-0,01	0,01	200
<i>Binalud</i>	0,31	0,22	29
<i>Gilave</i>	0,58	0,42	28
<i>Salamat Abad</i>	0,45	0,45	0
<i>Hashtad Joft</i>	0,43	0,41	5
<i>Gragoni</i>	0,58	0,46	21
<i>Pole Dokhtar</i>	0,61	0,47	23
<i>Motor Khane</i>	-0,24	-0,1	58
<i>Octor</i>	0,57	0,42	26
<i>Shadi Abad</i>	0,22	0,56	-155
<i>Mahneshan</i>	0,63	0,45	29
<i>Sarcham</i>	0,62	0,55	11
<i>Shari Chai</i>	-0,01	0,28	2900
<i>Granko (Myane)</i>	-0,4	-0,25	38

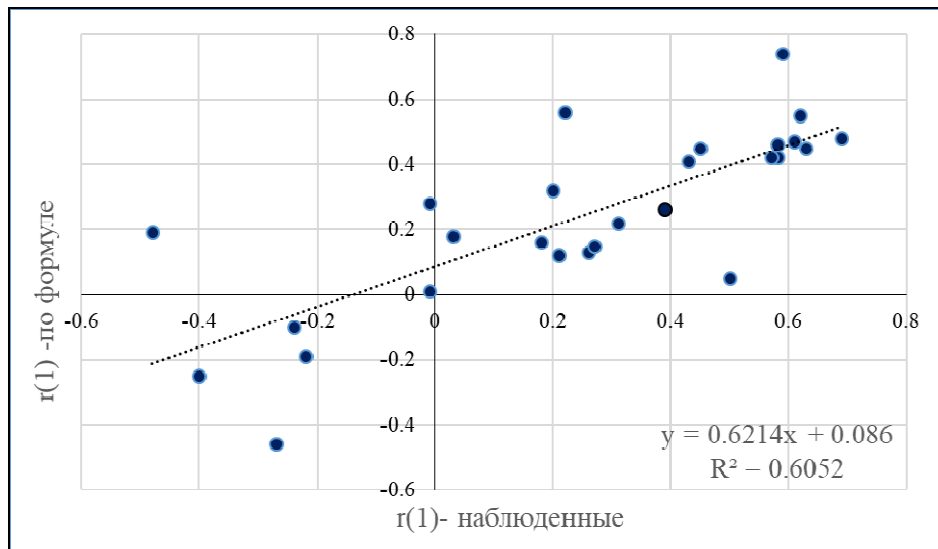


Рисунок 4.8 – График связи коэффициентов корреляции.

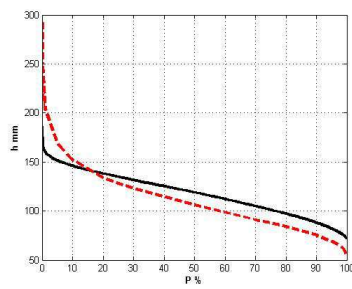
Таблица 4.2 – Условные величины слоя стока бассейна р. Карундля современного и сценарных климатических условий

Пункт	Факт. слой стока(с 1957 по 2005)			Прогнозные слои стока,мм											
				РТК 2,6						РТК 8,5					
				с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.			с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$
<i>Rahim Abad</i>	168	160	145	177	167	151	189	179	161	180	170	153	173	164	147
<i>Dorud</i>	322	303	271	294	278	251	312	295	266	299	283	255	290	274	246
<i>Sepid dast (sezar)</i>	*	*	*	325	309	282	341	324	295	328	312	284	323	308	279
<i>Behsht Abad</i>	*	*	*	255	248	230	279	274	255	260	255	237	259	248	228
<i>Dashte bozorg</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	311	287	247

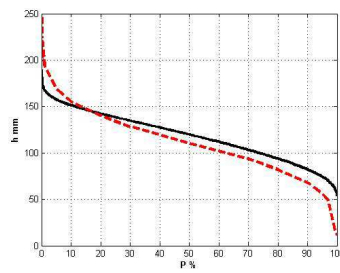
Таблица 4.3 – Условные величины слоя стока бассейна р. Сефидруд для современного и сценарных климатических условий

Пункт	Факт. слой стока (с 1957 по 2005)			Прогнозные слои стока, мм											
				РТК 2,6						РТК 8,5					
				с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.			с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
	$h_{0.1\%}$	$h_1\%$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_1\%$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_1\%$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_1\%$	$h_{10\%}$	$h_{0.1\%}$	$h_1\%$	$h_{10\%}$
<i>Binalud</i>	204	197	176	167	161	143	162	162	142	161	155	139	165	157	141
<i>Salamat Abad</i>	82	79	69	57	56	52	60	56	51	56	54	51	57	56	51
<i>Hashtad Joft</i>	154	143	125	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Gragoni-Ghezelozon</i>	106	103	91	84	80	74	80	79	74	80	78	71	82	80	75
<i>Iyanki Kand</i>	120	113	99	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Sarcham</i>	68	63	56	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Pole Dokhtar</i>	95	93	83	79	78	71	79	78	71	78	78	68	82	79	72
<i>Moter Khane</i>	216	201	175	172	163	147	177	167	151	166	157	142	168	159	144
<i>Ostor</i>	116	110	98	95	92	86	100	95	89	94	90	84	98	94	88
<i>Gilave</i>	104	100	92	104	100	92	111	106	98	105	100	92	108	104	95
<i>Myane (shahre Chai)</i>	195	188	166	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Myane-Granko</i>	119	112	99	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Mahnesha n-Ghezelozon</i>	109	103	91	84	80	74	84	80	74	79	76	70	83	80	74
<i>Shadi Abad-Cheshmeh shor</i>	37	36	32	29	28	26	29	28	26	28	27	25	28	27	26

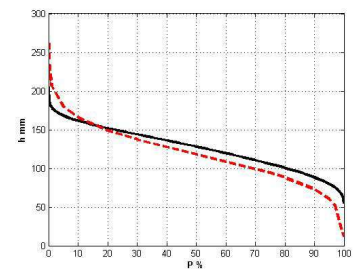
а)



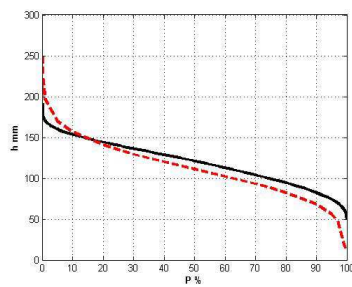
б)



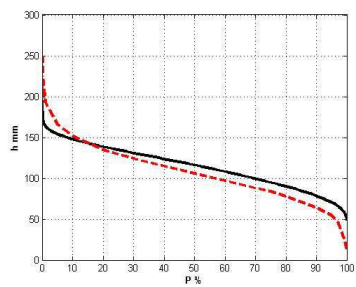
в)



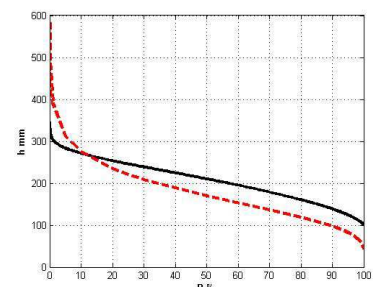
д)



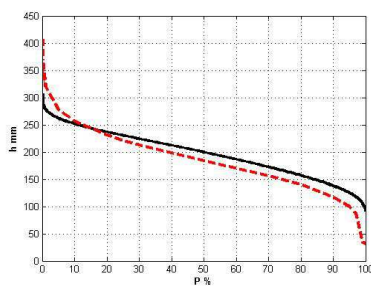
е)



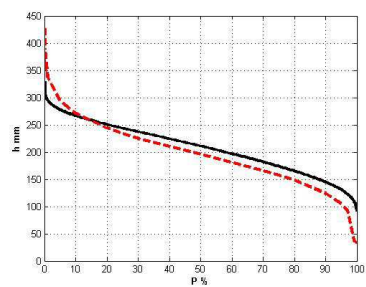
ж)



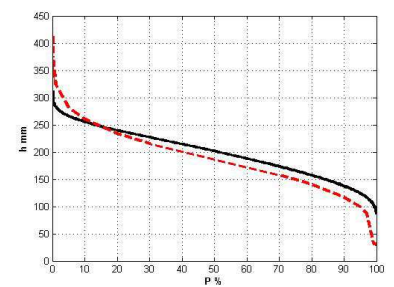
зс)



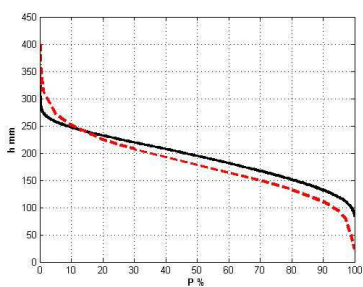
и)



к)



л)



— условная кривая, --- аналитическая кривая

Рисунок 4.9 – Кривая обеспеченности. Пост *Rahim Abad*: а – период с 1971 по 2000 гг., б – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), в – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), д – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), г – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5); пост *Dorud-Tire*: е – период с 1971 по 2000 гг., ж – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), и – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), к – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), л – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5).

5 МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОДАННЫХ ГИС УПРАВЛЕНИЯ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ

5.1. Общий подход к разработке метода

Развитие водохозяйственного комплекса любой страны, в том числе и Исламской республики Иран, предусматривает использование широкого набора экономических, технических и организационных мер при опережающей разработке [46]

- нормативно-правового,
- научно-технического,
- методического обеспечения.

Реализация этих 3-х основных направлений обеспечивается на основе взаимоувязанного выполнения общегосударственных и региональных целевых программ, направленных на решение задач развития водохозяйственного комплекса, рационализации водопользования и воспроизводства водных ресурсов, охраны и восстановления водных объектов, предотвращения и ликвидации вредного воздействия вод. Они должны быть оптимизированы с учетом приоритетности, сроков и возможностей осуществления при опережающей разработке схем комплексного использования и охраны водных ресурсов.

Сложность происходящих в водных объектах гидрогеологических, гидрохимических и гидробиологических процессов, на которые оказывает влияние антропогенная деятельность, обуславливает высокие требования к научно-техническому обеспечению водного хозяйства, включая проведение фундаментальных и прикладных исследований водных проблем, постоянное

научное сопровождение проектирования, строительства и эксплуатации крупных водохозяйственных систем и сооружений.

Большинство задач по использованию, воспроизводству и охране водных ресурсов, восстановлению водных объектов, обеспечению функционирования и сбалансированного развития водохозяйственного комплекса исключительно наукоемки. В связи с этим актуальными проблемами являются развитие научной сферы отрасли, сети научно-исследовательских и проектно-изыскательских организаций водохозяйственного профиля, в том числе головных научных и проектных организаций, широкое участие научных, общественных и международных организаций в решении задач развития водохозяйственного комплекса.

Одним из основных возможных направлений информационного обеспечения ГИС управления водопользованием является получение количественных оценок показателей речного стока, испарения, изменения бассейновых влагозапасов.

Реализация условий водопользования базируется на соответствующем процессе управления. Технология такого управления сводится к преобразованию информационных и деятельностных ресурсов в интересах достижения цели. Управление водопользованием использует информационные ресурсы в виде пространственных данных и связанных с ними непространственных, а также получение на их основе информации о географическом пространстве. Такой вид информационных ресурсов используется в геоинформационных системах (ГИС) [19, 61, 39, 68].

К основным компонентам ГИС относят:

- технические (аппаратные) средства,
- программные средства,
- информационное обеспечение.

Управление водопользованием в Исламской Республике Иран основано на прогнозировании среднегодового стока рек Ирана. Поэтому особый научный и практический интерес представляет формирование информацион-

ного обеспечения ГИС для прогнозирования среднегодового стока рек Ирана в виде пространственных данных, а также получение на их основе знаний о географическом пространстве.

Важное значение, как средство обеспечения экономики окружающей среды в рамках парадигмы устойчивого развития, имеют ГИС управления водопользованием. Эта система основана как на зондирование водохозяйственной системы, опирающейся на сеть наземных наблюдений, так и на результаты прогнозирования *характеристик показателей*

- *речного стока,*
- *испарения,*
- *изменения бассейновых влагозапасов.*

Как раз в настоящей работе рассмотрены вопросы прогнозирования показателей речного стока и испарения. Данные показатели являются основными конструктивными элементами формирования информационного обеспечения системы управления водопользованием.

Структура такой системы представляет собой распределенную систему. Эта система включает независимые, но связанные между собой хранилище данных, систему контроля, систему динамических оценок и прогнозирования, систему управления, информационную систему (ИС) обработки данных мониторинга [4, 38].

В качестве такой ИС целесообразно выбирать геоинформационную систему (ГИС). ИС управления водопользованием относится к проблемно ориентированным системам [67]. Эти информационные системы включают специализированные базы моделей. Все системы используют специальные типовые наборы моделей, которые на основе агрегации [66] позволяют строить сложные предметные модели. Особенностью системы управления водопользованием является необходимость координатного обеспечения геоданных, используемых в этой системе [3, 18].

В результате выработки управленческого решения осуществляется воздействие на объект водопользования. Результаты управления и данные об окружающей среде поступают в подсистему наблюдения. Система геоинформационного мониторинга образует замкнутую самоорганизующуюся систему. Интеграция системы управления водопользованием и ГИС привело к созданию геоинформационной системы управления водопользованием (ГИС УВП). Деятельность системы ГИС УВП должна обеспечивать получение гарантированного результата.

Основа деятельности – решение лица, принимающего решения (ЛПР). [20, 51, 61, 72, 111]. Поэтому самостоятельный научно-практический интерес представляет адекватная математическая модель решения ЛПР, направленная на рациональное управление водопользованием.

С другой стороны, в условиях динамики изменения характеристик окружающей среды в рамках парадигмы устойчивого развития территорий необходимо иметь модель формирования геоданных ГИС. *Из этого вытекает проблема интеграции двух процессов. Это:*

- процесс формирования геоданных (в настоящей работе *характеристик показателей речного стока, испарения и, возможно, изменения суммарных влагозапасов*)
- процесс формирования решения.

Процесс формирования геоданных при управлении водопользованием основан на прогнозировании характеристик показателя стока рек Исламской Республики Иран. Рассмотрению возможности интеграции этих двух процессов и рассмотрена в следующем пункте 5-го раздела.

5.2 Условия системной интеграции процесса формирования геоданных (характеристик показателей речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов) и процесса формирования управленческого решения

Решению задачи синтеза адекватной математической модели системной интеграции процесса формирования геоданных и процесса формирования решения ЛПР в интересах управления водопользованием и посвящен настоящий подраздел.

Постановка задачи на разработку метода

Управление процессом водопользованием требует формировать процессы с заранее заданными свойствами [6, 38]. В работе представлена концепция управления, основанная на синтезе, которая позволяет удовлетворять этим требованиям. Обеспечение устойчивого управления водопользованием для территориально разнесенных объектов строится на базе использования данных от геоинформационных систем. Получение и обработка данных для ГИС – наиболее важный и трудоемкий этап создания подобных информационных систем. В настоящее время при управлении водопользованием одним перспективным и экономически целесообразным считается метод получения данных о гидрологических объектах на основе распределенной наземной сети наблюдательных пунктов [40, 52, 72].

Данные от ГИС управления водопользованием необходимо использовать для формирования решения лицом, принимающим решение (ЛПР). При этом возникает проблема установления связи между данными ГИС и моделью решения ЛПР в интересах гарантированного достижения цели деятельности.

Не располагая методологическими основами решения задач управления водопользованием в форме условия существования процесса, мы не можем гарантировать достижение цели деятельности [7, 5, 8].

В основе деятельности лежит решение человека. Человек осуществляет свою деятельность на основе модели [2, 87, 90]. Поэтому для осуществления

деятельности адекватной гидрометеорологической обстановке необходимо располагать адекватной математической моделью решения человека [2, 87, 90]. Сложилась интересная ситуация: в публикациях по выработке управленческого утверждается, что построить математическую модель решения человека весьма проблематично, если не сказать, что нельзя. А в публикациях представлены только результаты обоснования решения, но не модель самого решения! Но без математической модели решения весьма сложно гарантировать достижения цели управления водопользованием. Такая же ситуация и с построением системы обеспечения управления водопользованием, так как отсутствует критерий синтеза правильно построенной системы [2, 87, 90]. Данная совокупность факторов определяет актуальность настоящего раздела диссертации. А целью является выбор и обоснование условия гарантированного достижения цели управления водопользованием на основе синтеза математической модели решения. Только условие существования процесса управления водопользованием на основе синтеза математической модели решения позволит увязать в единое целое данные от ГИС, полученные на основе характеристик показателей стока рек, испарения и изменения суммарных влагозапасов Исламской Республики Иран с элементами математической модели решения ЛПР. Получение условия существования процесса управления водопользованием позволяет построить конструктивную технологию. Технология управления водопользованием – это преобразования информационных и деятельностных ресурсов ЛПР в интересах достижения цели деятельности.

5.3 Естественно–научный подход к синтезу модели системной интеграции процесса формирования геоданных и процесса решения человека

В процессе деятельности по организации и управлению процессом водопользования зачастую возникает ситуация, когда результаты принимаемых решений не оправдывают ожидания человека. Неудовлетворительный результат управления обоснован противоречивыми выводами. Для исключения противоречивых выводов следует использовать аксиоматический метод [87, 90]. Только этот метод позволяет исключить произвол в рассуждениях. Аксиоматический метод предполагает существование следующих элементов [87, 90]:

а) основные допущения и предположения, обычно выражающиеся в базовых принципах.

б) базовые понятия, ключевые слова, аксиомы;

в) правила вывода;

г) теоремы.

Для объективного использования данного метода необходимо отметить, что в процессе деятельности участвуют

а) Человек, его сознание.

б) Окружающий МИР (объект).

в) Нечто, что дано природой и позволяет осуществлять познание.

(Всеобщая связь.)

Для формирования условий, гарантирующих достижения цели деятельности используется естественно-научный подход (ЕНП) к управлению водопользованием. ЕНП определяется интеграцией свойств Мышления человека, окружающего Мира и Познания [6], реализуется научно-педагогической школой «Системная интеграция процессов государственного управления» [54]. Трехкомпонентность отражается в трех принципах:

а) *Принцип* трехкомпонентности познания.

Компонент А. Абстрактное представление (Условие существования).
(Методология.)

Компонент В. Абстрактно-конкретное. (Причинно-следственные связи.) (Методы).

Компонент С. Конкретное представление (Технологии. Алгоритмы.)

б) *Принцип* целостности Мира. Реализуется ЗСЦО [7, 5, 6]. Это устойчивая, объективная, повторяющаяся связь свойств объекта и действия при фиксированном предназначении.

в) *Принцип* познаваемости Мира. Реализуется методами. Декомпозиция. Абстрагирование. Агрегирование.

Принцип трехкомпонентности познания состоит в том, что человек, осознанно или нет, осуществляет выработку решения в трех уровнях представления обстановки: а – абстрактный уровень (формируется условие существования процесса), б – абстрактно-конкретный уровень (формируются причинно-следственные связи), в – конкретный (формируются условия реализации причинно-следственных связей). Только зная условие существования процесса, человек может гарантированно достигать цели деятельности.

В процессе деятельности человек оперирует с категориями «система», «модель» и «предназначение» [7, 87, 90]. Поэтому особенно корректно необходимо рассматривать и использовать эти категории.

Известно всего два направления разработки системы (модели). Разработка системы на основе анализа и разработка на основе синтеза. Такой подход известен из монографии по системотехнике [16]. Анохин П.К. указывал и экспериментально подтвердил, что для *синтеза системы необходимо выявить «основную закономерность»* общей теории функциональных систем [2]. В том числе обращался к ведущим специалистам в области создания и исследования (например, к М. Месаровичу и др. [110]) с вопросом о разработке формализованного критерия построения системы. Однако данный вопрос ответа не получил в известных публикациях, но разрабаты-

вается научно-педагогической школой «Системная интеграция процессов государственного управления» в форме закона сохранения целостности объекта [54]. Поэтому в настоящей работе для синтеза модели решение используется ЗСЦО [7, 5].

Также следует рассмотреть особенность синтеза модели объекта (процесса). Ключевым моментом является условие ее адекватности. Наиболее приемлемым подходом для оценивания адекватности является «полнота учета основных закономерностей предметной области».

Если в области естественных наук для адекватности разрабатываемой модели используются законы физики, химии, то области сложных систем, социальных, экономических, технико-технологических систем и прочих предлагается использовать закон сохранения целостности [7, 5].

5.4 Общий подход к синтезу модели решения при управлении водопользованием

В основе деятельности всегда лежит решение ЛПР [110]. Человек принимает на основе модели [7, 2].

Под моделью объекта будем понимать *описание или представление объекта, соответствующее объекту и позволяющее получать характеристики об этом объекте*. Поэтому решение – модель процесса, с которым работает человек. Процесс – это объект в действии при фиксированном предназначении. Для синтеза применяем ЕНП, базирующийся на ЗСЦО [7].

Закон сохранения целостности объекта (ЗСЦО) – устойчивая повторяющаяся связь свойств объекта и свойств действия при фиксированном предназначении. ЗСЦО проявляется во взаимной трансформации свойств объекта и свойств его действия при фиксированном предназначении.

В соответствии с разработанным ЕНП [87, 90] каждый процесс должен быть представлен тремя компонентами, соответствующим свойствам «объективность», «целостность» и «изменчивость» (или понятиям «объект», «предназначение» и «действие» соответственно). Эти три компоненты располагаются по горизонтали. С одной стороны, они могут интерпретироваться в трех различных уровнях познания мира (абстрактном, абстрактно-конкретном, конкретном). Такой подход определяет наличие трех уровней по вертикали. На рисунке 5.1. представлена структурная схема развертывания содержания понятия «Решение» [87, 90].

Следуя работам научной школы [86, 89, 54], введем следующие определения.

Управленческое решение – Условия обеспечение субъектом условий реализации предназначения объекта, которым он управляет, в соответствующей обстановке в интересах достижения цели управления.

Обстановка– совокупность факторов и условий, в которых осуществляется деятельность.

Информационно-аналитическая работа– непрерывное добывание, сбор, изучение, отображение и анализ данных об обстановке. Например, маркетинг, разведка, мониторинг. Разложив понятие «управленческое решение» на три базовых элемента «обстановка», «информационно-аналитическая работа» и собственно «решение» необходимо перейти к синтезу модели решения. На рисунке 5.2 представлена структурная схема синтеза модели. Как было отмечено, из системотехники известно [16], что возможны только два подхода к построению модели:

- разработка на основе анализа;
- разработка на основе синтеза.

Анализный подход обладает существенным недостатком – он не позволяет формировать процессы с наперед заданными свойствами, что особенно важно в условиях обеспечения безопасности дорожного движения.

Подход, основанный на синтезе, позволяет получать гарантию достижения цели и лишен основного недостатка аналитического подхода, что и предопределило необходимость применения синтеза модели управления процессом обеспечения ЭБ в данной работе, руководствуясь принципами Трехкомпонентности познания, Целостности и Познаваемости осуществим синтез модели. На рисунке 5.2 представлена структурная схема основных этапов синтеза модели управленческого решения.



Рисунок 5.1 – Структурная схема, разворачивания содержания категории «решение» как процесс.

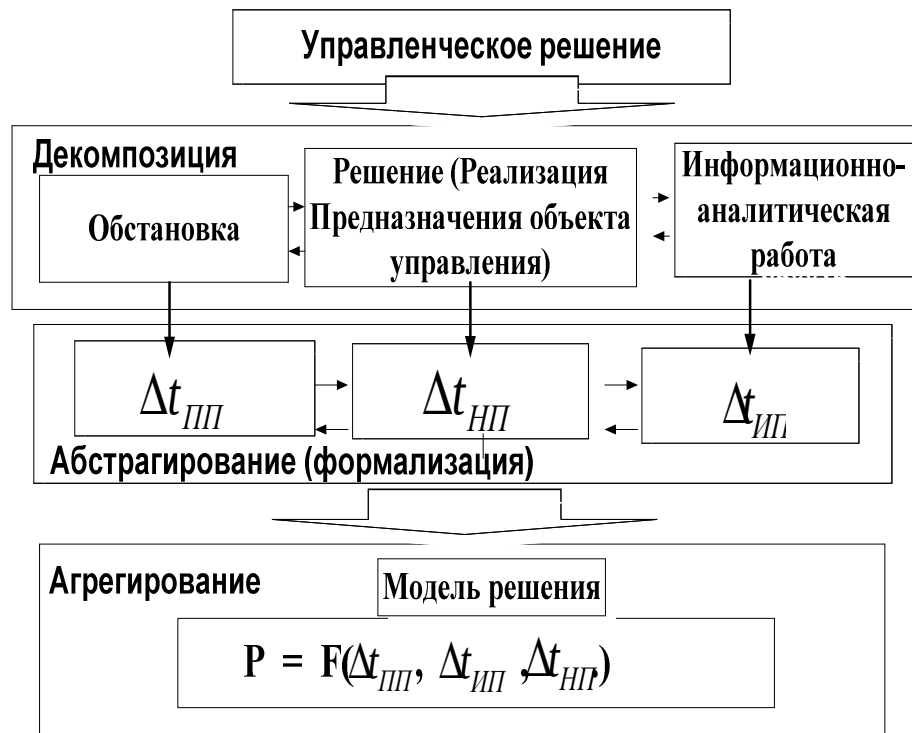


Рисунок 5.2 – Структурная схема интерпретации процесса синтеза математической модели «Решения».

На 1-ом уровне, применяя метод декомпозиции, расчлняем решение именно на три элемента «обстановка», «решение» и «информационно-аналитическая работа», которые соответствуют «объекту», «предназначению» и «действию». Применяя на 2-ом уровне метод абстрагирования, мы отождествляем «объект» («обстановка») с периодичностью проявления проблемы перед человеком – $\Delta t_{ПП}$. «Предназначение» («Решение») отождествляем с периодичностью нейтрализации проблемы (средним временем адекватным реагированием на проблему) человеком – $\Delta t_{НП}$. «Действие» («Информационно-аналитическая работа») отождествляем с периодичностью идентификации проблемы (средним временем распознавания ситуации) – $\Delta t_{ИП}$. Временные характеристики обоснованы тем, что только временные ресурсы для человека невосполнимы. Также результаты исследования в теории функциональных систем академика АН СССР Анохина П.К. показали, что решение человека формируется в схеме «возбуждение», «распознавание», «реакция на обстановку». Поэтому в работе исполь-

зудается следующая диаграмма изменения базовых компонентов формирования модели решения (рисунок 5.3).

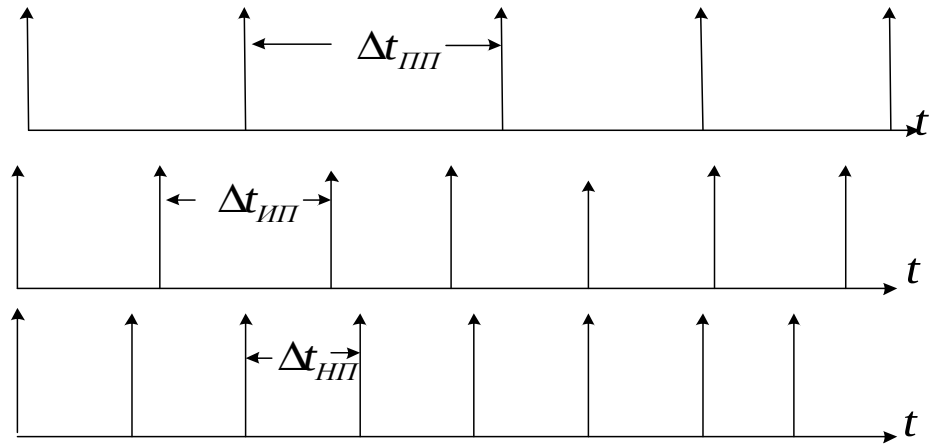


Рисунок 5.3 – Диаграмма проявления базовых элементов формирования модели решения.

5.5. Синтез модели управления водопользованием без учета требуемых ресурсов прогнозирования характеристик геоданных

В результате применения методов декомпозиции, абстрагирования и агрегирования мы преобразовали понятие «управленческое решение» в агрегат – математическую модель управленческого решения следующего вида [87, 90]:

$$P = F(\Delta t_{III}, \Delta t_{II}, \Delta t_{HI}).$$

Это есть условие существования процесса управления водопользованием. В силу того, что базовая модель управленческого решения имеет три элемента, представим структурную схему управления следующим образом

(рисунок 5.4) [8, 85, 86, 87]. На рисунке 5.4. λ – величина, обратная среднему времени проявления проблемы; v_1 – величина, обратная среднему времени идентификации проблемы; v_2 – величина, обратная среднему времени нейтрализации проблемы. ЛПР при управлении может выполнять в различных сочетаниях две функции:

- идентифицировать (распознавать) проблему;
- нейтрализовывать (задействовать ресурсы обеспечения водопользование) проблему.

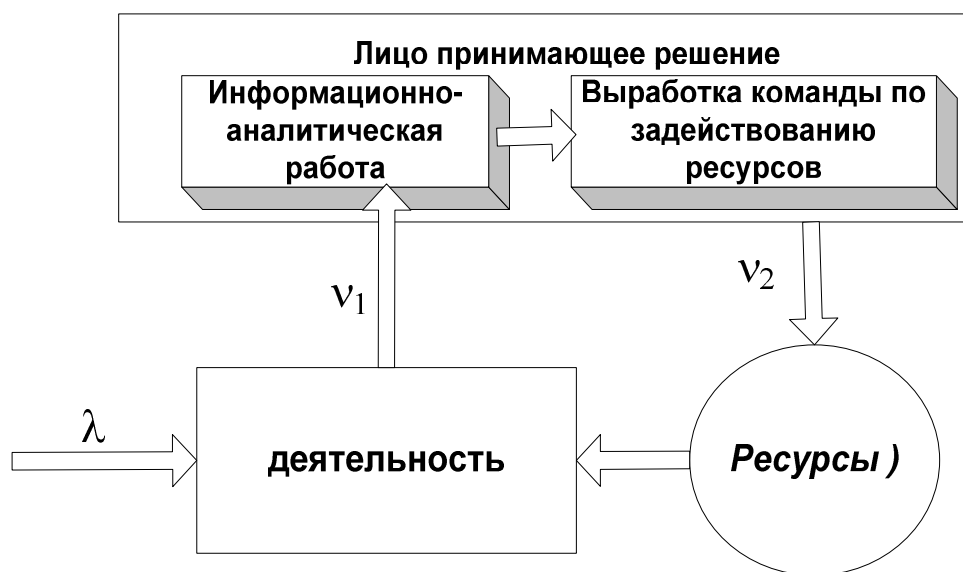


Рисунок 5.4 – Структурная схема управления водопользования.

Поэтому модель решение ЛПР характеризует четыре базовых состояния:

A_{00} – ЛПР не идентифицирует и не нейтрализует;

A_{10} – ЛПР идентифицирует и не нейтрализует;

A_{01} –ЛПР не идентифицирует и нейтрализует;

A_{11} – ЛПР идентифицирует и нейтрализует.

В соответствии с описанной особенностью управленческого решения необходимо ввести вероятности нахождения нашей системы управления в

этих четырех состояниях. Мы соответственно получаем четыре вероятности P_{00} , P_{10} , P_{01} , P_{11} , соответствующие нахождению системы в состояниях A_{00} , A_{10} , A_{01} , A_{11} . Процесс формирования решения можно рассмотреть как цепь Маркова, например, в работе по исследованию безопасности [89]. Так как такой подход не позволяет в достаточной мере учитывать динамику процесса, то в настоящей работе целесообразно использовать непрерывные цепи Маркова. Для реализации такого подхода необходимо составить систему дифференциальных уравнений Колмогорова–Чепмена. Поэтому характеристику переходов системы представим на рисунке 5.5. Допустим, что система находится в начальном состоянии A_{00} . При появлении проблемы под воздействием интенсивности λ она переходит в состояние A_{10} , т.е. в состояние распознавания проблемы. Из этого состояния система под воздействием интенсивности v_1 осуществляется переход в состояние A_{01} , в котором система начинает процесс нейтрализации проблемы с интенсивностью v_2 и переводит систему в состояние A_{00} . Эта ситуация возможна, если проблема нейтрализована, а очередная проблема еще не образовалась. Если образовалась проблема, под воздействием интенсивности λ система переходит в состояние A_{11} . Находясь в состоянии A_{11} , под воздействием интенсивности v_1 система переходит в состояние A_{01} , если проблема распознана, и переходит в состояние A_{10} под воздействием интенсивности v_1 , если одна проблема нейтрализована. Далее на вход поступает очередная проблема и ее надо распознавать. Процесс повторяется.

Для описания процесса изменения состояний на графе необходимо сделать следующие допущения и предположения.

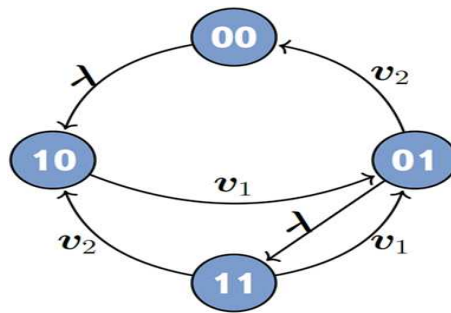


Рисунок 5.5 – Граф состояний, процесса формирования управленческого решения.

- а) Рассатривается схема формирования решения человека в форме информационно-управляющей системы. На основе решения формируется процесс водопользования.
- б) Промежутки времени между моментами обнаружения фактов
- в) проявления проблем являются величинами случайными.
- г) Обнаруженные факты во времени образуют поток, близкий к потоку Пуассона.
- д) Время обработки данных о требуемом признаке является величиной случайной.
- е) Данные о признаках распределяются далее между выделенными ресурсами, решающими соответствующие целевые задачи по управлению водопользованием.
- ж) Рассматривается случай, когда время пребывания требуемых признаков (фактов) в области действия системы (человека) весьма ограничено и соизмеримо со временем, которое необходимо для их идентификации, а также обработки данных и принятия адекватных действий по этим признакам.
- з) Система подготовлена к решению задач распознаванию и нейтрализации проблем.
- и) Разрабатываемая система (решение человека) предназначена для оценивания потенциальных возможностей системы управления водопользованием в зависимости от обстановки.

Введенные допущения и предположения позволяют использовать систему дифференциальных уравнений Колмогорова [7, 5].

При изучении марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем в графе состояний над стрелками, ведущими из состояния S_i в S_j , проставляют соответствующие интенсивности λ_{ij} . Такой граф состояний называют *размеченным*.

Пусть система S имеет конечное число состояний $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$. Случайный процесс, протекающий в этой системе, описывается вероятностями состояний $P_0(t), P_1(t), \dots, P_n(t)$, где $P_i(t)$ — вероятность того, что система S в момент t находится в состоянии S_i . Для любого t выполняется соотношение (5.1):

$$\sum_{i=0}^n P_i(t) = 1 \quad (5.1)$$

Вероятности состояний $P_i(t)$ находят путем решения системы *дифференциальных уравнений (уравнений Колмогорова)*, имеющих вид (5.2), где $i = 0, 1, \dots, n$.

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} P_j(t) - P_i(t) \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \quad (5.2)$$

Величина $\lambda_{ji} P_j(t)$ называется потоком вероятности перехода из состояния S_i в S_j , причем интенсивность потоков λ_{ij} может зависеть от времени или быть постоянной.

Уравнения типа (5.2) составляют по размеченному графу состояний системы, пользуясь следующим *мнемоническим правилом*: производная вероятности каждого состояния равна сумме всех потоков вероятности, идущих из других состояний в данное состояние, минус сумма всех потоков вероятности, идущих из данного состояния в другие.

Чтобы решить систему дифференциальных уравнений (5.2), нужно задать начальное распределение вероятностей $P_0(0), P_1(0), \dots, P_n(0)$. Для решения применяют Численные методы.

Тогда составим систему ДУ Колмогорова для нашей ситуации. Она будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} P_{00}(t) &= -P_{00}(t)\lambda + P_{01}(t)v_2 \\ \frac{d}{dt} P_{01}(t) &= -P_{01}(t)(\lambda + v_2) + P_{11}(t)v_1 + P_{10}(t)v_1 \\ \frac{d}{dt} P_{10}(t) &= P_{00}(t)\lambda - P_{10}(t)v_1 + P_{11}(t)v_2 \\ \frac{d}{dt} P_{11}(t) &= P_{01}(t)\lambda - P_{11}(t)(v_1 + v_2)\end{aligned}\tag{5.3}$$

Для системы ДУ (5.3) накладывается следующее ограничение:

$$P_{00}(t) + P_{10}(t) + P_{01}(t) + P_{11}(t) = 1.\tag{5.4}$$

Система (5.3) решается для заданных начальных условий

а) В общем случае используем соотношения (5.5), где правые части некоторые константы – вероятности нахождения системы в соответствующих состояниях.

$$P_{00}(0) = P_{00}^*; P_{10}(0) = P_{10}^*; P_{01}(0) = P_{10}^*; P_{11}(0) = P_{11}^*\tag{5.5.}$$

б) В случае, когда система находится в состоянии A_{00} , т. е., проблема, на которую надо реагировать отсутствует, не рассматривается и не обрабатывается.

$$P_{00}(0) = 1; P_{10}(0) = 0; P_{01}(0) = 0; P_{11}(0) = 0;\tag{5.6.}$$

Рассмотрев процесс как динамический, перейдем к выявлению возможностей рассмотрения этого процесса как стационарного, не нарушая общности рассуждений.

Если предположить, что мы имеем стационарный процесс, тогда наша исходная система дифференциальных уравнений трансформируется в систему линейных однородных алгебраических уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} -P_{00}(t)\lambda + P_{01}(t)\nu_2 &= 0; \\ -P_{01}(t)(\lambda + \nu_2) + P_{11}(t)\nu_1 + P_{10}(t)\nu_1 &= 0; \\ P_{00}(t)\lambda - P_{10}(t)\nu_1 + P_{11}(t)\nu_2 &= 0; \\ P_{01}(t)\lambda - P_{11}(t)(\nu_1 + \nu_2) &= 0. \end{aligned} \quad (5.6.)$$

Это есть система линейных алгебраических уравнений относительно четырех неизвестных P_{00} , P_{10} , P_{01} , P_{11} , которые связаны между собой следующим соотношением $P_{00} + P_{10} + P_{01} + P_{11} = 1$.

Искомые вероятности уже не зависят от времени. Решением данной линейной алгебраической системы уравнений являются следующие соотношения:

$$P_{00} = \frac{\nu_1\nu_2}{\lambda(\lambda + \nu_1 + \nu_2) + \nu_1\nu_2} \quad (5.7)$$

$$P_{10} = \frac{\lambda\nu_2(\lambda + \nu_1 + \nu_2)}{(\nu_1 + \nu_2)[\lambda(\lambda + \nu_1 + \nu_2) + \nu_1\nu_2]}, \quad (5.8.)$$

$$P_{01} = \frac{\lambda\nu_1}{\lambda(\lambda + \nu_1 + \nu_2) + \nu_1\nu_2}, \quad (5.9)$$

$$P_{11} = \frac{\lambda\nu_1}{(\nu_1 + \nu_2)[(\lambda + \nu_1 + \nu_2) + \nu_1\nu_2]}. \quad (5.10)$$

Получив соотношения, определяющие вероятности нахождения системы в состояниях A_{00} , A_{10} , A_{01} , A_{11} , мы можем выработать требования к свойствам процесса распознавания проблемы, возникшей в системе и к свой-

ствам процесса нейтрализации этой проблемы в системе управления водопользованием. То есть вероятность идентификации и нейтрализации проблемы, возникшей определяется из соотношения (5.11)

$$P_{00} = P_{инп} = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2} \quad (5.11)$$

В этом соотношении связаны три параметра. Таким образом мы установили аналитическую зависимость обобщенных характеристик обстановки ($\Delta t_{пп}$), информационно-аналитической деятельности ($\Delta t_{инп}$) и нейтрализации проблемы ($\Delta t_{нп}$), возникшей при управлении водопользованием. Следуя работе академика Анохина П.К. [2], мы получили системообразующий фактор создания системы управления водопользованием в форме соотношения (5.11). Структурная схема представлена на рисунке 5.4.

В работе получено и рассматривается соотношение (5.11) как условие существования процесса управления водопользованием. При управлении водопользованием ЛПР поступает следующим образом. ЛПР задает показатель уровня эффективности функционирования системы водопользования в виде $P_{инп}$. Это вероятность того, что каждая проблема, возникающая перед ЛПР распознается и решается. В результате обследования объекта водопользования формируется процесс образования проблемы. Этот процесс представляется как функция среднего времени образования проблемы перед ЛПР в форме $\Delta t_{пп} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (см. диаграмму на рисунке 5.3). Эта функция связывает между собой состояния процесса образования проблемы и соответствующие работы, обеспечивающие достижения этих состояний.

Располагая характеристикой обстановки (средним временем проявления проблемы, которую надо решить), управленец системы водополь-

зования, исходя из условия обеспечения показателя эффективности управления водопользованием, формирует следующие два требуемых процесса.

Процесс идентификации проблемы (распознавания обстановки), описанием которого является функция $\Delta t_{\text{ип}} = f_2(y_1, y_2, \dots, y_m)$ (диаграмма на рисунке 5.3).

Процесс нейтрализации проблемы, описанием которого является функция $\Delta t_{\text{нп}} = f_3(z_1, z_2, \dots, z_k)$ (диаграмма на рисунке 5.3).

На диаграмме:

- вектор X характеризует процесс образования проблемы при управлении водопользованием,
- Y характеризует процесс распознавания ситуации,
- Z характеризует процесс нейтрализации проблемы при управлении водопользованием.

Распознавание и нейтрализация строятся на основе использования ГИС. Как раз вектор X , Y , Z формируется на основе геоданных, полученных от ГИС управления водопользованием.

В целом, в настоящем разделе предложены основы построения технологии управления водопользованием. Синтез системы управления водопользованием на основе системы дифференциальных уравнений позволил реализовать гарантированный подход к управлению. Модель управления, в частности граф состояний, может быть далее усложнена, введением дополнительных обратных связей и учетом других условий.

Рассмотрев математическую модель решения человека как системообразующий фактор построения системы управления водопользованием, в этом разделе работы сделано допущение, что прогнозирование характеристик геоданных осуществляется без затрат ресурсов, т. е. процесс прогнозирования в модели не учитывается. Однако в практике управления водопользованием участвует процесс прогнозирования характеристик показателей речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов.

Однако результаты исследований, изложенные в настоящем разделе, целесообразно использовать для количественного оценивания соотношения характеристик процесса образования проблемы (λ), процесса идентификации проблемы (v_1) и процесса нейтрализации проблем (v_2). Для этого необходимо использовать условие существования процесса управления водопользованием без учета процесса прогнозирования характеристик геоданных в виде следующего соотношения $P_{00} = P_{инп} = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2}$.

Так например, если мы хотим обеспечить степень достижения цели с вероятностью не меньше 0,8, то λ , v_1 , v_2 должны удовлетворять следующему соотношению $\lambda \geq 8v_1$, $\lambda \geq 8v_2$.

Учитывая это соотношение, разработаем математическую модель ГИС управления водопользованием на основе учета процесса прогнозирования геоданных.

5.6 Синтез модели управления водопользованием с учетом требуемых ресурсов прогнозирования характеристик геоданных

Общий подход к синтезу модели управлением водопользованием с учетом требуемых ресурсов прогнозирования характеристик геоданных

В результате применения методов декомпозиции, абстрагирования и агрегирования мы преобразовали понятие «управленческое решение» в Агрегат – математическую модель управленческого решения следующего вида [85, 86]:

$$P = F(T_{\text{э}}, \Delta t_{\text{пп}}, \Delta t_{\text{инп}}, \Delta t_{\text{нп}}).$$

Это есть условие существования процесса управления водопользованием с учетом затрат на процесс прогнозирования. Этой характеристикой является время, требуемое на прогнозирование характеристик геоданных (T_{Σ}) (характеристик *показателей стока рек, испарения и изменения суммарных влагозапасов*). Графическая иллюстрация процесса представлена рисунке 5.6.

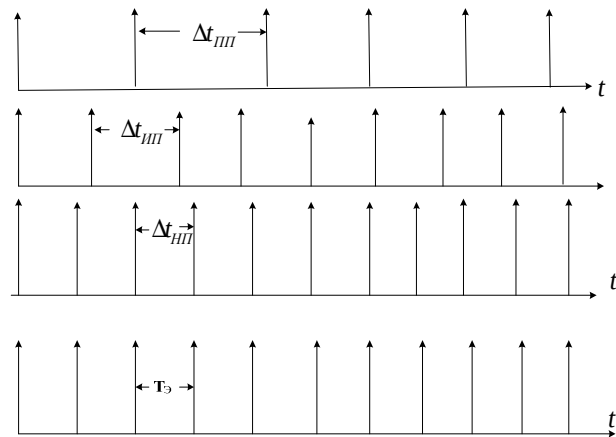


Рисунок 5.6 – Диаграмма проявления базовых элементов формирования модели решения с учетом процесса прогнозирования.

Рассмотренные четыре процесса, представленные на диаграммах, характеризуют процесс функционирования ГИС управления водопользованием с учетом особенностей прогнозирования характеристик геоданных. Четыре характеристики процессов T_{Σ} , Δt_{III} , Δt_{III} , Δt_{III} удовлетворяют допущениям и предположениям, перечисленных в п.п. 5.4. Введенные допущения и предположения позволяют использовать систему дифференциальных уравнений Колмогорова [5].

При изучении марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем в графе состояний над стрелками, ведущими из состояния S_i в S_j , проставляют соответствующие интенсивности λ_{ij} .

Такой граф состояний называют *размеченным*. В нашем случае представим его в виде следующего (рисунок 5.7).

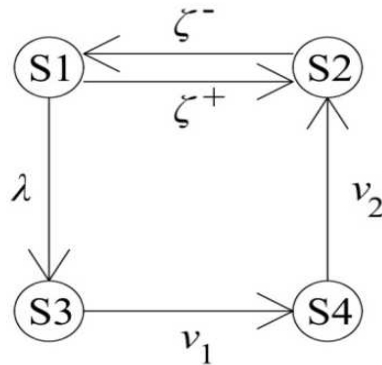


Рисунок 5.7 – Граф процесса функционирования ГИС управления водопользованием.

Процесс прогнозирования характеристик геоданных управления водопользованием – показателей речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов – можно представить в виде следующей зависимости:

$$T_{\mathfrak{D}} = f_0(\mathfrak{X}_1, \mathfrak{X}_2, \dots, \mathfrak{X}_e). \quad (5.12)$$

В этой зависимости компоненты вектора $\mathfrak{X}$ характеризуют состояния процесса прогнозирования характеристик геоданных, функция $f_0(\dots)$ описывает действия (работы), которые надо выполнить при достижении соответствующих состояний $(\mathfrak{X}_1, \mathfrak{X}_2, \dots, \mathfrak{X}_e)$.

В итоге мы получаем четыре зависимости, которые формируют процесс функционирования ГИС управления водопользованием в интересах обеспечения достижения требуемого показателя эффективности функционирования процесса управления водопользованием:

$$T_{\mathfrak{D}} = f_0(\mathfrak{X}_1, \mathfrak{X}_2, \dots, \mathfrak{X}_e).$$

$$\Delta t_{nn} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad .(5.13)$$

$$\Delta t_{un} = f_2 (y_1, y_2, \dots y_m).$$

$$\Delta t_{nn} = f_3 (z_1, z_2, \dots z_k).$$

Таким образом к трем базовым процессам, формирующих решение при управлении водопользованием добавляется зависимость (5.12). Надо установить связь этих четырех процессов с показателем эффективности функционирования ГИС управления водопользованием.

Показателем эффективности функционирования в этом случае является вероятность того, что каждая проблема (задача), возникающая в системе управления водопользованием идентифицируется (распознается) и нейтрализуется (решается) при условии требуемой реализации процесса прогнозирования характеристик геоданных (показателей речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов). При учете ограничений на

- информационные ресурсы,
- деятельностные ресурсы,
- ресурсы обстановки,
- ресурсы системы прогнозирования геоданных.

$T_{\Sigma}, \Delta t_{пп}, \Delta t_{ип}, \Delta t_{нп}$ есть случайные величины, удовлетворяющие допущениям и ограничениям, перечисленным в предыдущем разделе диссертации.

В рамках наших рассуждений система управления водопользованием на основе применения данных ГИС может находиться в четырех состояниях:

S1– штатная ситуация функционирования системы управления водопользованием, которая не требует формирования управляющих воздействий; Начало описания базового процесса функционирования ГИС.

S2– ситуация функционирования системы управления, в которой она находится в результате реализации управляющего воздействия, разрабо-

танного системой управления водопользованием на основе идентификации проблемы (задачи) и ее нейтрализации (решения).

Для перевода системы из состояния $S1$ в состояние $S2$ требуется время $T_{\exists}$. Это есть среднее время реализации прогнозирования характеристик геоданных для конкретной задачи, возникшей в контуре системы управления водопользованием.

Так как известен и хорошо апробирован математический аппарат описания марковских процессов в виде уравнений Колмогорова–Чепмена, то в работе перейдем от абсолютных значений времени ($T_{\exists}$, $\Delta t_{пп}$, $\Delta t_{ип}$, $\Delta t_{нп}$) к частоте (интенсивности) наступления соответствующих событий (ζ^+ , λ , ν_1 , ν_2 , ν_2). Для уточнения описания введем следующие обозначения:

$$\zeta^+ = 1/T_{\exists}, \lambda = 1/\Delta t_{пп}, \nu_1 = 1/\Delta t_{ип}, \nu_2 = 1/\Delta t_{нп} \quad .(5.14)$$

Для определения пригодности алгоритмического обеспечения прогнозирования характеристик геоданных для ГИС управления водопользованием введем показатель частоты срыва процесса прогнозирования— ζ^- , то есть, насколько часто результаты прогнозирования характеристик геоданных могут не соответствовать требованиям процесса управления водопользования:

$S3$ — состояние (ситуация) проявления проблемы (задачи) в контуре системы управления водопользованием;

$S4$ — состояние (ситуация) идентификации (выявления) проблемы (задачи), которую надо решить системой управления водопользованием.

При решении практических задач управления водопользованием основным элементом является состояние, соответствующее достижению цели. В реальных условиях управленец или система управлением водопользованием может оказаться в двух ситуациях:

– ЛПР или ГИС управления водопользованием не готовы к данным характеристикам сложившейся обстановки;

– ЛПР или система управления водопользованием готовы к разрешению возникшей проблемы в процессе управления, но это требует от него дополнительных временных ресурсов.

Для того чтобы учесть в модели эти две базовые ситуации мы как раз выделяем четыре базовых состояния:

– первое состояние – это состояние, в котором находится объект управления на начало рассматриваемого процесса;

– второе состояние – это состояние, которое характеризует достижение процессом (объектом) цели управления.

В процессе управления могут возникнуть две ситуации:

а) Штатная ситуация – такая ситуация, при которой запускаются отработанные схемы.

б) Нештатная ситуация – такая ситуация, при которой в процессе управления возникает проблема. В такой ситуации, как правило, возможности ГИС управлением водопользованием не соответствуют характеристикам сложившейся ситуации и необходимо подключать дополнительные ресурсы для разрешения возникшей проблемы.

Исходя из этого, можно выделить третье базовое состояние системы, которое обусловлено фактом появления проблемы – состояние 3.

При нахождении ГИС управления водопользованием в состоянии 3 появляется необходимость в идентификации (распознавании) возникшей проблемы. Очевидно, что ГИС управления водопользованием тратит время ($\Delta t_{\text{ип}}$ – время идентификации проблемы) на идентификацию (распознавание) данной задачи. В этом состоянии происходит поиск и подготовка к подключению новых – дополнительных ресурсов для устранения возникшей проблемы. Следовательно, вместе с этим в процессе анализа решения ГИС управления водопользованием переходит в состояние 4, в котором ГИС определяет уже какие дополнительные ресурсы ей нужно задействовать и

как ими воспользоваться, чтобы цель управления была достигнута. В этом состоянии ЛПР или ГИС может устранить проблему, но ему нужно какое-то время $\Delta t_{\text{нп}}$ для достижения цели, поэтому система переходит из состояния 4 в состояние 2, следовательно, задача решается.

Во 2-ом состоянии системы может сложиться две ситуации:

а) ГИС управления водопользованием затратила слишком большое количество времени для достижения поставленных целей, что, по сути, равнозначно невыполнению целевой задачи процесса управления. Это соответствует факту срыва решения задачи прогнозирования.

б) ГИС управления водопользованием затратила допустимое количество времени на решение поставленной задачи.

Такая логика рассуждений подтверждает целесообразность формирования графа представленного на рисунке 5.10.

Разработка механизма связи элементов модели с показателем эффективности функционирования ГИС управления водопользованием

Под механизмом связи элементов модели построения и функционирования ГИС управления водопользованием в работе понимается Реализация причинно-следственных связей.

Анализ результатов диссертационной работы и публикаций [5, 8, 88] показал, базовые элементы процесса функционирования ГИС управления водопользованием удовлетворяют предположениям и допущениям, сформулированным в данном разделе. Поэтому для определения вероятностей нахождения ГИС управления водопользованием в рассмотренных четырех базовых состояниях на основе решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова–Чепмена.

Составим систему уравнений Колмогорова для графа состояний на рисунке 5.7:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\zeta^+ + \lambda) \cdot P_1(t) + \zeta^- \cdot P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \zeta^+ \cdot P_1(t) - \zeta^- \cdot P_2(t) + \nu_2 \cdot P_4(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda \cdot P_1(t) - \nu_1 \cdot P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \nu_1 \cdot P_3(t) - \nu_2 \cdot P_4(t). \end{cases} \quad (5.15)$$

Тогда финальные вероятности могут быть получены путем решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -(\zeta^+ + \lambda) \cdot P_1 + \zeta^- \cdot P_2, \\ 0 = \zeta^+ \cdot P_1 - \zeta^- \cdot P_2 + \nu_2 \cdot P_4, \\ 0 = \lambda \cdot P_1 - \nu_1 \cdot P_3, \\ 1 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4. \end{cases}, \quad (5.16)$$

Решаем эту систему линейных уравнений методом Крамера в *Mathcad*:

$$A = \begin{bmatrix} -(\zeta^+ + \lambda) & \zeta^- & 0 & 0 \\ \zeta^+ & -\zeta^- & 0 & \nu_2 \\ \lambda & 0 & -\nu_1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} A := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

Решение системы имеет вид:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\zeta^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}{\lambda \cdot \zeta^- \cdot \nu_1 + \lambda \cdot \zeta^- \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \zeta^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \zeta^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}, \\ P_2 &= \frac{\lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \zeta^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}{\lambda \cdot \zeta^- \cdot \nu_1 + \lambda \cdot \zeta^- \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \zeta^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \zeta^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}, \\ P_3 &= \frac{\lambda \cdot \zeta^- \cdot \nu_2}{\lambda \cdot \zeta^- \cdot \nu_1 + \lambda \cdot \zeta^- \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \zeta^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \zeta^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}, \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$P_4 = \frac{\lambda \cdot \zeta^- \cdot v_1}{\lambda \cdot \zeta^- \cdot v_1 + \lambda \cdot \zeta^- \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^+ \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^- \cdot v_1 \cdot v_2}.$$

Эти вероятности характеризуют степень меры возможностей нахождения ГИС управления водопользованием в соответствующем состоянии.

Показателем эффективности функционирования ГИС управлением водопользованием является вероятность того, что каждая проблема (задача) возникающая перед ГИС управлением водопользованием будет идентифицирована и нейтрализована при соответствующих

- интенсивности прогноза характеристик геоданных;
- показатель пригодности методики прогнозирования.

Этот определяется соотношением:

$$P_2 = \frac{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^+ \cdot v_1 \cdot v_2}{\lambda \cdot \zeta^- \cdot v_1 + \lambda \cdot \zeta^- \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^+ \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^- \cdot v_1 \cdot v_2}, \quad (5.19)$$

Соотношение для P_2 есть по своей сути уравнение с несколькими неизвестными. Одним из вариантов которого можно рассмотреть вариант с одним неизвестным. Для конкретного варианта обстановки, задав требуемый уровень показателя эффективности функционирования ГИС управления водопользованием P_2 , мы можем определить значение показателя пригодности ζ^- как решение одного уравнения относительно одного неизвестного.

$$P_2 = F(\zeta^+, \zeta^-, \lambda, v_1, v_2, v_2), \quad (5.20)$$

По показателю пригодности мы можем судить о качестве методики прогнозирования характеристик геоданных для управления водопользованием.

В целом условие существования процесса (5.20) при знании финальных вероятностей позволяет выявить требуемые характеристики обстановки при управлении водопользованием. При этом характеристики удовлетворяют условиям существования процесса управления водопользованием. И тем самым гарантируют достижение цели деятельности водопользования.

В соотношении (5.20)

P_2 – показатель эффективности функционирования ГИС управления водопользованием;

$\zeta^+ = 0,001543$ – интенсивность решения задачи прогнозирования;

ζ^- – интенсивность срыва решения задачи прогнозирования;

$\lambda = 0,036$ – интенсивность проявления проблемы;

$\nu_1 = 0,365$ – интенсивность идентификации проблемы;

$\nu_2 = 0,046$ – интенсивность нейтрализации проблемы;

$T_{\exists} = 648$ условных ед. времени. Длительность жизненного цикла. Количество проблем – 24.

Подставим все значения в выражение (5.20) и найдем вероятность выполнения задачи P_2 с учетом частоты (ζ^-), которая характеризует среднее количества срыва выполнения прогноза, что является показателем пригодности и показывает успешность выполнения задачи ГИС управления водопользованием.

Если $\zeta^- = 1/50$, то $P_2 = 0,5$;

если $\zeta^- = 1/100$, то $P_2 = 0,667$;

если $\zeta^- = 1/150$, то $P_2 = 0,75$;

если $\zeta^- = 1/200$, то $P_2 = 0,8$;

если $\zeta^- = 1/250$, то $P_2 = 0,833$;

если $\zeta^- = 1/300$, то $P_2 = 0,857$.

Расчеты показывают, что с увеличением количеств успешного выполнения прогнозов, вероятность P_2 увеличивается, а следовательно возраста-

ет востребованность методики прогнозирования для ГИС управления водопользованием (рисунок 5.8).

Выявив механизмы связи элементов модели с показателем эффективности функционирования ГИС управления водопользованием сформулируем метод обоснования требований к прогнозированию характеристик геоданных.

Под методом в известных публикациях обычно понимаю следующее [59].

Метод (от греческого *methodos* – путь исследования, теория, учение) – способ достижения какой-либо цели, решения конкретной задачи; – совокупность приемов или операций практического или теоретического освоения (познания) действительности.

В философии метод – способ построения и обоснования системы философского знания.

Мы отметили в работе понятие метода. Однако более существенным признаком метода является его предназначение.

Предназначение метода заключается в формировании условий перевода из некоторого исходного состояния объекта исследования в требуемое.

В рамках наших рассуждений под методом обоснования требований к прогнозированию характеристик геоданных будем понимать следующее.

Регламентация процесса прогнозирования условием существования функционирования ГИС управления водопользованием следующего вида:

$$P_2 = \frac{\lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^+ \cdot v_1 \cdot v_2}{\lambda \cdot \zeta^- \cdot v_1 + \lambda \cdot \zeta^- \cdot v_2 + \lambda \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^+ \cdot v_1 \cdot v_2 + \zeta^- \cdot v_1 \cdot v_2}, \quad (5.21)$$

где процесс прогнозирования характеризуется следующими элементами:

$\zeta^+ = 1/T_{\Theta} = 1/f_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_e)$ – обобщенная модель процесса прогнозирования характеристик геоданных ГИС управления водопользованием.

ζ^- – частота срывов процесса прогнозирования при достижении цели.

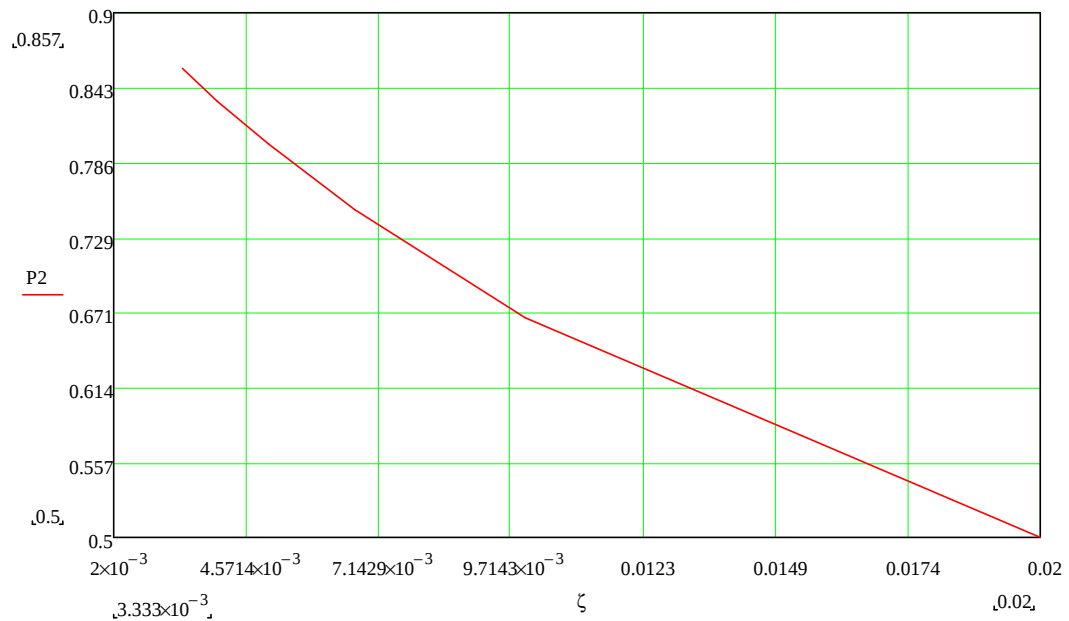


Рисунок 5.8 – Зависимость показателя эффективности функционирования ГИС управления водопользованием от показателя пригодности методики прогнозирования характеристик геоданных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и *итоги* диссертационного исследования:

Настоящая диссертация посвящена разработке и адаптации для условий Ирана методики совместного учета вероятностных распределений стока и испарения с возможностью их сценарной оценки и наглядного визуального представления их обеспеченных значений одномерным многообразием в многомерном пространстве и условных распределений плотности вероятности речного стока.

Основные результаты, полученные по завершении представленной работы, можно изложить следующим образом.

а) После обработки фактических рядов наблюдений за речным стоком и осадками удалось создать синхронные ряды этих гидрометеорологических характеристик и сгенерировать ряды испарения для дальнейшего статистического анализа и обработки совместно с рядами многолетнего речного стока.

б) Синхронные совместные ряды стока и испарения прошли проверку на стационарность (однородность) по статистическим критериям Фишера и Стьюдента, а также – на наличие многоводных и маловодных периодов путем построения разностно-интегральных кривых. В результате удалось сформировать базу данных для речных бассейнов Ирана, необходимых для получения двумерных вероятностных распределений стока, в которую вошло 58 статистически приемлемых (уровень значимости 5 %) рядов для получения условных распределений речного стока с устойчивой нормой и коэффициентом вариации.

в) Построены двумерные распределения плотности вероятности $p(Q, E)$, с использованием которых получены безусловные и условные распределения $p(Q)$ с повышенной устойчивостью статистических моментов за

счет частичной разгрузки от мультипликативных шумов, порождаемых вариациями потерь стока на испарение.

г) Установлено, что с уменьшением обеспеченности расходов воды расхождение хвостов условных и безусловных кривых вероятностных распределений увеличиваются.

д) Найдена возможность визуализации совместных кривых обеспеченности речного стока и испарения путем построения совместных одномерных многообразий в трехмерном пространстве – обеспеченность – сток – испарение, которая реализована на примере речных бассейнов Ирана для условий существующего и сценарного климата в XXI в.

е) Разработана методика прогноза условных кривых плотности вероятности.

ж) Разработан метод обоснования требований к формированию гео-данных для информационного обеспечения ГИС управления водопользованием.

В таблицах показаны основные результаты. В списке литературы с 130 по 143 пункт указаны публикации автора диссертации.

Таблица 1 – Сценарная оценка нормы стока

Климатический сценарий	Период	Станции, по которым не будет статистически значимых отклонений нормы стока	Станции, по которым будет максимальное изменение нормы стока
РТК 2,6	с 2020 по 2049 гг	<i>Kata, Barez, Pole krakhsbast, Tange Panj (sezar), Dashte bozorg</i>	<i>Mahneshan</i> (поменьше), <i>Shadiabad</i> (уменьшение)

Продолжение таблицы 1

	с 2050 по 2079 гг	<i>Patave, Kata, Barez, Rahim Abad, Solegan, Armand, Tange Panj (sezar), Myane-Granko</i>	Shadi Abad
РТК 8,5	с 2020 по 2049 гг	<i>Patave, Kata, Rahim Abad, Solegan, Armand, Tange Panj (sezar)</i>	<i>Barez (повышение), ShadiAbad (умень- шение)</i>
	с 2050 по 2079 гг	<i>Rahim Abad, Tange Panj (sezar), Pole krakhsbast</i>	<i>Barez, Shadi Abad</i>

Таблица 2 – Сценарная оценка коэффициента вариации годового стока

Климатический сценарий	Период	Станции, по кото- рым не будет ста- тистически значи- мых отклонений C_v	Станции, по кото- рым будет макси- мальное изменение C_v
РТК 2,6	с 2020 по 2049 гг	<i>Kata, Rahim Abad, Dashte bozorg</i>	<i>Sarcham, Shadi Abad, Salamat Abad</i>
	с 2050 по 2079 гг	<i>Kata, Rahim Abad, Dashte bozorg</i>	<i>Sarcham, Shadi Abad, Salamat Abad</i>
РТК 8,5	с 2020 по 2049 гг	<i>Kata, Rahim Abad, Dashte bozorg</i>	<i>Sarcham, Shadi Abad, Salamat Abad</i>
	с 2050 по 2079 гг	<i>Kata, Rahim Abad</i>	<i>Sarcham, Shadi Abad, Salamat Abad</i>

Рекомендации

Методические основы построения и функционирования геоинформационной системы прогнозирования среднегодового стока рек Ирана в условиях экстремальных сценариев рекомендуется использовать в оперативной практике организациями управления водохозяйственной деятельностью Ирана.

Полученные двумерные эмпирические распределения $p(Q, E)$ по 28 водосборам, а также построенные совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения для экстремальных климатических сценариев рекомендуется использовать для решения гидрологических задач различного вида в Иране.

Возможности метода обоснования требований к характеристикам геоданных ГИС управления при развитии системы рекомендуется использовать управлениями водохозяйственной деятельностью Ирана.

Также в диссертации получено, что изменение климата в Иране следует учитывать при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, относящихся к I и II классу капитальности по классификации по производственной эффективности, значению сооружения и сроку службы. Такой вывод сделан на основе рассчитанных отклонений прогнозных значений нормы слоя стока от фактических, наибольшие отклонения характерны для малых обеспеченностей.

Перспектива

Полученные карты распределения гидрометеорологических характеристик открывают широкие возможности по оценке чувствительности водозависимых отраслей экономики (гидротехническое строительство, ирригация, гидроэнергетика и т. п.) к возможным климатическим изменениям. Представленная в диссертации методика не связана с глобальным потеплением или похолоданием. Для нее важно наличие самого сценария с необходимыми данными по ожидаемым температурам воздуха и осадкам.

Автором планируется результаты диссертации применить для оценки экономических последствий изменения климата в Иране.

Список использованных источников

- 1 Аверина, Ю.М. Эколого-экономические аспекты рационального водопользования / Ю.М. Аверина, А.Н. Субчева, В.С. Шумова, В.В. Меньшиков, С. Ю. Тыквинский // Успехи в химии и химической технологии. Том XXVII, №1, 2013. – С. 133–136.
- 2 Анохин, П.К. Системные механизмы высшей нервной деятельности / П.К. Анохин. – М.: «Наука», 1979. – 454 с.
- 3 Бондур, В.Г. Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях / В.Г. Бондур, А.И. Савин // Исследование Земли из космоса, № 6, 1992. – С. 70–78.
- 4 Бондур, В.Г. Проблемы мониторинга и предсказания природных катастроф / В.Г.Бондур, К.Я. Кондратьев, В.Ф. Крапивин, В.П. Савиных. – Исследования Земли из космоса, № 1, 2005. – С. 3–14.
- 5 Бурлов, В.Г. Математические методы моделирования в экономике / В.Г. Бурлов. – Часть 1, СПб. СПбГПУ, Факультет безопасности, НП «Стратегия будущего», 2007. – 330 с.
- 6 Бурлов, В.Г. О концепции гарантированного управления устойчивым развитием арктической зоны на основе решения обратной задачи / В.Г. Бурлов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право, № 2 (16), 2015. – С. 99–111.
- 7 Бурлов, В.Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов (Методология. Методы) / В.Г. Бурлов. – СПб: Факультет Комплексной Безопасности, СПбГПУ, 2007. – 265 с.
- 8 Бурлов, В.Г. Управление процессом применения космической геоинформационной системы в интересах обеспечения экологической безопасности региона / В.Г. Бурлов, Н.Н. Попов, Х.А. Гарсия Эскалона //

Ученые записки российского государственного гидрометеорологического университета, № 50, 2018. – С. 119–129.

9 Винокуров, И. О. К вопросу об определении периодов повышенной и пониженной водности рек / И. О. Винокуров // Молодой ученый, № 7(30) Том I, 2011. – С. 72–74.

10 Владимиров, А.М. Гидрологические расчеты / А.М. Владимиров. – Л.: Гидрометеониздат, 1990. – 365 с.

11 Гайдукова, Е.В. Критический анализ методов расчета суммарного испарения для речных бассейнов Африки / Е.В. Гайдукова, Х.Диавара, Э. Бонгу // Теория и практика современной науки. – Москва: Изд-во «Институт стратегических исследований», 2014. – С. 531–537.

12 Гайдукова, Е.В. Фрактальная диагностика летне-осеннего минимального стока России / Е.В. Гайдукова, М.Н. Громова, // Ученые записки РГГМУ, № 21, 2011. – С. 20–24.

13 Гайдукова, Е.В. Апробация методики долгосрочного прогнозирования статистических характеристик на речных бассейнах Ирана / Е.В. Гайдукова, А. Джалалванд, Л. Синкпеун // Международный научно-исследовательский журнал, № 04 (58) Часть 1 Апрель. – Екатеринбург, 2017. – С. 80–86.

14 Горошков, И.Ф. Практические задания по курсу гидрологические расчеты / И.Ф. Горошков, В. Г. Орлов, Т. А. Соколова. – Ленинград, 1976. – 56 с.

15 Гуд, Г.Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г.Х. Гуд, Р.Э. Макол. – М.: Советское радио, 1962. – 383 с.

16 Диавара, Х. Долгосрочная оценка вероятностных распределений многолетнего годового испарения при изменении климата на примере Африканского континента: Дис. канд. Техн. Наук: 25.00.27 / Хамиду Диавара. – СПб: РГГМУ, 2016. – 111 с.

17 Догановский, А.М. Гидрология суши (общий курс) / А.М. Догановский; – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2012. – 523 с.

18 Егоров, В.М. Координатное обеспечение международной аэрокосмической системы глобального мониторинга / В.М. Егоров, В. Я. Цветков // Полет, № 4, 2012. – С. 34–37.

19 Истомин, Е.П. Феномен геоинформационного управления и принципы его реализации / Е. П. Истомин, С.А. Кирсанов, А. Г. Соколов, О.Н. Колбина // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология. География, №4, 2014. – С. 180–188.

20 Капралов, Е. Г. Основы геоинформатики в двух книгах книга 2: Учеб. пособие для 0-75 студ. вузов / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов, А. А. Аширов, Ю. Б. Баранов, В. Д. Гайдуков, В. В. Глазырин, В. В. Грошев, С. С. Замай, С. В. Ершов, А. Б. Кияшко, М. Я. Козлов, С. А. Миллер, В. А. Охонин, В. И. Пырьев, В. Н. Семин, Б. Б. Серапинас, А. В. Симонов, К. Г. Стафеев, Д. А. Старостенко, А. С. Степаненко, А.Ф.Сурнин, С. В. Трибунский, С.А. Цымбал, О. Э. Якубайлик. Под ред. В.С.Тикунова. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 480 с.

21 Каракаш, Д. Географические информационные системы. Использование ГИС технологий для оценки загрязнения окружающей среды на примере г. Ялта [Электронный ресурс]/ Д.Каракаш. – Мега Лекции, 2015–2019. – Режим доступа: [<https://megalektsii.ru/s13687t6.html>].

22 Коваленко В. В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии/ В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2011. – 107 с.

23 Коваленко, В.В. Выбросы размерности фазовых пространств прогностических и диагностических моделей развития процессов катастрофического формирования многолетнего речного стока / В. В. Коваленко// Ученые записки РГГМУ, № 15, 2010. –С. 5–18.

24 Коваленко, В.В. Гидродинамическое моделирование природных процессов: Философско-методологические основания частично инфинитного моделирования в гидрологии. Учебное пособие / В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во. РГГМУ, 2014. – 39 с.

25 Коваленко, В.В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата / В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во. РГГМУ, 2009. – 100 с.

26 Коваленко, В.В. Критерии устойчивого развития гидрологических процессов и картирование зон ожидаемых аномалий параметров годового стока рек СНГ при антропогенном изменении климата / В.В. Коваленко, В. А. Хаустов // Метеорология и гидрология, № 12, 1998. – С. 96–102.

27 Коваленко, В.В. Метаморфоз понятий частично инфинитной гидрологии в контексте деструкции онтологии М. Хайдеггером / В. В. Коваленко. – Монография. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2015. – 132 с.

28 Коваленко, В.В. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при не установившемся климате / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, М. Н. Громова, В.А. Хаустов, Е. В. Шевнина. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2010. – 51 с.

29 Коваленко, В.В. Модальная неустойчивость при формировании речного стока / В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2014. – 190 с.

30 Коваленко, В.В. Моделирование гидрологических процессов / В. В. Коваленко, Н. В. Викторова, Е. В. Гайдукова // Учебник. – Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб. Изд-во . РГГМУ, 2006. – 559 с.

31 Коваленко, В.В. Новые явления и закономерности формирования речного стока. / В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2013. – 172 с.

32 Коваленко, В.В. О возможности учета испарения при моделировании процесса формирования многолетнего речного стока (на примере Западной Африки) / В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Ф.Л. Соловьев, С.Э. Бонгу, А. Джалалванд // Ученые записки РГГМУ. № 44, 2016. – С. 45–53.

33 Коваленко, В.В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии / В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2011. – 107 с.

- 34 Коваленко, В.В. Частично инфинитная гидрология / В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2007. – 230 с.
- 35 Коваленко, В.В. Частично инфинитное моделирование: примеры, основания, парадоксы / В. В. Коваленко. – СПб. Политехника, 2005. – 486 с.
- 36 Коваленко, В.В. Частично инфинитное расширение фазового пространства модели формирования многолетнего речного стока для статистически устойчивого прогнозирования катастроф / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова Ф. Л. Соловьев, Д. В. Чистяков // Естественные и технические науки, № 2, 2009. – С. 193–199.
- 37 , процессов / В. В. Коваленко. – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2006. – 166 с.
- 38 Лупян, Е.А. Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, А. А. Мазуров, Р. Р. Назиров, А. А. Прошин, Е. В. Флитман, Ю. с. Крашенинникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 8. № 1, 2011. – С. 26–43.
- 39 Лурье, И.К. Основы геоинформатики и создание ГИС. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / И. К. Лурье. Под ред. А. М. Берлянта. – М.: Изд-во ООО ИНЕКС-92, 2002. – 140 с.
- 40 Магомедова, А.В. Исследование русловых перестроений устьевых участков р. Терек с использованием ГИС-технологий / А. В. Магомедова, З. А. Курбанова // Труды Международной конференции по эрозионно-селевым явлениям. Тбилиси, 2001. – С. 118–121.
- 41 Международная группа экспертов по изменению климата (IPCC), Отчёты [Электронный ресурс]. – IPCC, 2019. – Режим доступа: [<https://www.ipcc.ch/homelanguagesmainrussian.shtml>].
- 42 Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа,

Резюме для политиков, Техническое резюме и Часто задаваемые вопросы [Электронный ресурс]– IPCC, 2013. – Режим доступа: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_RUSSIAN.pdf].

43 Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, СПб, Государственное учреждение «Государственный гидрологический институт» ГУ «ГГИ» Нестор-История 2009, Протокол № 1.

44 Мирзаев Н.Н. Управление водопоставкой и водопользованием. // НИЦ МКВК [тронный ресурс] – Cawater-info. – Режим доступа: [<http://www.cawater-info.net/bk/8-3.htm>].

45 Модест, К.К. Сценарная оценка долговечных изменений вероятностных характеристик многолетнего стока Юго-Западной Африки: Дис. канд. Техн. Наук: 25.00.27 / Куасси. Куаме Модест. – СПб: РГГМУ, 2014. – 150 с.

46 Мумладзе, Р. Управление водохозяйственными системами: учебник / Р. Мумладзе, Г. Гужина, Н. Быковская, А. Кузьмина. – М.: КНОРУС, 2010. – 208 с.

47 Насири, А.М. Создание геопортала для решения задач рационального использования водных ресурсов равнины Гармсар в Иране / А.М. Насири, В.А. Широкова, Р.С. Широков // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, № 5–6, 2015. – С. 32–38.

48 Насири, А.М. Рациональное использование водных ресурсов равнины Гармсар в Иране с использованием ГИС – технологий [Электронный ресурс] / А.М. Насири, С.А. Зареи //Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования», № 2 (часть 2),2015. – Режим доступа: [<https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22487>].

49 Научная школа «Системная интеграция процессов государственного управления» [Электронный ресурс]. – Реестр ведущих научных

и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга. – Режим доступа: [<http://knvsh.gov.spb.ru/media/files/contests/closed/85/Spisok%202>].

50 Общая гидрология [Электронный ресурс]. – Башкирский Государственный Аграрный Университет, 2016. – Режим доступа: [<https://studfiles.net/preview/4258630/page:2/>].

51 Ольгаренко, В.И. Эксплуатация и мониторинг мелиоративных систем: учеб. для ВУЗов / В. И. Ольгаренко. – Коломна, 2006. – 391 с.

52 Орлова, Е.В. Определение географических и гидрологических характеристик бассейна Печоры с использованием ГИС-технологии / Е.В. Орлова // Метеорология и гидрология, №4, 2008. – С.81–88.

53 Прошкина, Б.И. Климат нестабилен по вине человека? [тронный ресурс] –/ Б. И. Прошкина // Экология и жизнь, № 6, 2009. – С. 60–63. – Режим доступа: [<http://www.ecolife.ru/1/Klimat%20unstability.pdf>].

54 Реестр ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга [Электронный ресурс] –Режим доступа: [<http://is.ifmo.ru/aboutus/2013/science-schools.pdf>].

55 Речной сток и его характеристики [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://industrial-wood.ru/transport-lesa/6199-rechnoy-stok-i-ego-harakteristiki.html#sel>].

56 Салохиддинов, А.Т. Управление водными ресурсами/ А.Т. Салохиддинов, Р.К. Икрамов, М.Н. Тимирова. – Ташкент, ТИМИ, 2013. – 210 с.

57 Сикан, А.В. Статистические методы обработки гидрологической информации / А.В. Сикан. – СПб: Изд-во. РГГМУ, 2007. –279 с.

58 Сикан, А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации / А.В. Сикан. – Учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». – СПб: Изд-во . РГГМУ, 2007. – 279 с.

59 Советский энциклопедический словарь . – М.: «Советская энциклопедия», 1985.

60 Соловьев, Ф.Л. Повышение устойчивости вероятностных распределений многолетнего годового стока при прогнозировании долгосрочных его изменений (на примере Европейской территории России): Дис. канд. Техн. Наук: 25.00.27/ Филипп Леонидович Соловьев. – СПб, РГГМУ, 2009. – 131 с.

61 Сочава, В.Б. Введение в учение о геосистемах / В. Б. Сочава. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1978. – 319 с.

62 Субчева, А.Н. Эколого-экономические аспекты рационального водопользования / А.Н. Субчева, Ю.М. Аверина, В.С.Шумова, В.В. Меньшиков, С.Ю. Тыквинский// Успехи в химии и химической технологии, Том 27, №1, 2013. – С. 133–136.

63 Форум Корреспондентов Ирана, Центральной Азии и России (CA-IRNEWS) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://www.ca-irnews.com/ru/>].

64 Харлова, Ю.А. Системный подход в области решения экономических проблем водопользования Российской Федерации / Ю.А. Харлова // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т., т. 3, ч. 1. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 226–230.

65 Харлова, Ю.А. Предпосылки создания организационно-экономического механизма рационального водопользования (на примере бассейна Верхней Оби)/ Ю.А. Харлова // Вестник УГТИ-УПИ Серия: Экономика и управление, № 4. 2007. – С. 59–64.

66 Цветков, В. Я. Агрегирование информационных моделей / В. Я. Цветков, В. Т. Матчин // Славянский форум, 2(6), 2016. – С. 77–81.

67 Цветков, В.Я. Разработка проблемно ориентированных систем управления / В. Я. Цветков. – М.: ГКНТ, ВНИЦентр, 1991. –131 с.

68 Ципилева, Т.А. Геоинформационные системы: Учебное пособие / Т. А. Ципилева. – Томск: Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, 2004. – 162с.

- 69 Чернокульский, А. Российская наука – об изменении климата (глобальном потеплении) [Электронный ресурс] / Чернокульский А.– 2018. – Режим доступа: [<http://renen.ru/russian-science-on-climate-change-global-warming/>].
- 70 Шевнина, Е.В. Долгосрочная оценка статистических характеристик максимального стока на территории Российской Арктики: Дис. канд. Техн. Наук: 25.00.27 / Шевнина ЕленаВалентиновна. – СПб: РГГМУ, 2015. – 358 с.
- 71 Шевнина, Е.В. Оценка качества методики долгосрочного прогнозирования вероятностных характеристик многолетнего слоя стока весеннего половодья на ретроспективном материале / Е.В. Шевнина // Проблемы Арктики и Антарктики, №3(93), 2012. – С. 40–50.
- 72 Шихов, А.Н. Геоинформационные системы: применение ГИС-технологий при решении гидрологических задач: практикум: учеб. пособие / А.Н. Шихов, Е. С.Черепанова, А.И. Пономарчук; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. –Пермь, 2014. – 91 с.
- 73 Щедрин, В.Н. Пути совершенствования планового водопользования на оросительных системах: Научный обзор / В.Н. Щедрин, А.С. Штанько, О.В. Воеводин, А.Л. Кожанов, С.Л. Жук, А.Е. Шепелев. – ФГБНУ «РосНИИПМ» Новочеркасск, 2014.– 36с.
- 74 Элти, Дж. Экспертные системы: концепции и примеры. / пер. с англ. / Дж. Элти, М. Кумбс. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 190 с.
- 75 Янишевский, Н.А. Организация планового водопользования с учетом современных требований сельскохозяйственного производства/ Н.А. Янишевский. – Ташкент: ОИИВХ, 1957. – 36 с.
- 76 Al.Barrak, A. Evaporation and potential evaporations in central Iraq/ A. Al.Barrak. – Theses of Master of Science, UTAH state university, 1964. – P. 203.
- 77 Alizade ,A. Principal applied hydrology (35th edition) / A. Alizade. – Emam Reza Univ. Press. 2013. – P. 628.

78 Annual Distribution Map of Iran's Climatic Elements (сайт на персидском языке) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.havagerash.ir/post/224] .

79 Asabina, E. Multilevel river classification as the methodological basis for analysis of maximum runoff values in different geographical regions / E. Asabina // Water Resources Management. IAHS Publ. 313, 2007. – P. 365–373.

80 Ashofteh, P.S. Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply / P.S. Ashofteh, O. Bozorg Haddad, M. A. Mariño // Journal of Irrigation and Drainage Engineering, volume 139 Issue 2. – 2013. – P. 85–97, doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000496.

81 Ashofteh, P.S. Scenario Assessment of Streamflow Simulation and its Transition Probability in Future Periods Under Climate Change / P.S. Ashofteh, O. Bozorg Haddad, M. A. Mariño // Water Resource Manage, Volume 27, Issue 1, 2013. – P. 255–274 .

82 Azar, A. Statistics and its Application in Management (Vol. 2): Statistical Analysis / A. Azar, M. Mömeny. – SAMT pub, 2016. – P. 476.

83 Bekele, E.G. Watershed modeling to Assessing Impacts of potential Climate Change on water supply Availability / E.G. Bekele, H.V. Knapp // Water Resour Manage, Volume 24, Issue 13. – 2010. – P. 3299–3320, DOI 10.1007/s 11269-010-9607-y.

84 Burlov, V.G. The methodological basis for solving the problems of the information warfare and security protection/ V.G. Burlov // 13th International Conference on Cyber Warfare & Security (ICCWS 2018), National Defense University, Washington DC, USA, 2018. –P. 64–74.

85 Burlov, V.G Development of a Model for Social System Management in the Construction Process Taking into Account Manager's Qualification / V.G. Burlov, A. M. Grobitski // Humanities & Science University Journal. №15, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia, 2015. – P. 25–36.

86 Burlov, V.G. Construction management in terms of indicator of the successfully fulfilled production task / V.G. Burlov, A.M. Grobitski, A.M. Grobitskaya // Инженерно-строительный журнал, № 3(63), 2016. – С. 77–91.

87 Burlov, V.G. Law of Conservation of the integrity of an Object - The Methodological Basis for the Strategic Management of Complex Social and Economic Systems / V.G. Burlov // 17th European Conference on Research Methodology for Business and Management Studies ECRM 2018 Hosted By The University of Roma TRE Rome, Italy, 2018. – P. 66–72.

88 Burlov, V.G. Management of the application of the space geoinformation system in the interests of ensuring the environmental safety of the region/ V.G. Burlov, N.N. Popov //Volume 161 of the Advances in the Astronautical Sciences Series Third IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems 2017, DyCoSS',2017. – P. 751–759.

89 Burlov, V.G. Method of consecutive expert estimates in control problems for the development of large-scale potentially dangerous systems [Электронный ресурс] – V.G. Burlov, V.F. Volkov // Engineering Simulation, vol. 12 (1), 1994. – P.110–115.Режим доступа: [http://www.scopusfeedback.com/4-4-result-review_documents.html].

90 Burlov, V.G. The Methodological Basis for the Management of Social Media / V.G. Burlov // 5th European Conference on Social Media ECSM 2018 Hosted by Limerick Institute of TechnologyIreland, 2018. – P. 22–30.

91 Climatechange [Электронный ресурс] –Wikipedia. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_change //].

92 Climate of Iran[Электронный ресурс] –Wikipedia. – Режим доступа: [<http://www.steptoiran.com/Files/0618144036760800.aspx>].

93 Earth System Grid Federation, (сайт) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<https://esgf-ode.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>].

94 Environment department of the Australian Government, Representative Concentration Pathways (RCPs) [Электронный ресурс] – fact sheet,

2013, 3 p. – Режимдоступа: [<http://www.environment.gov.au/climate-change/publications/fact-sheet-rcps>].

95 Evans, J.P. CORDEX – An international climate downscaling initiative / J.P. Evans // 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 2011. – P. 2705–2711.

96 Fowler, H. J. Review Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling / H. J. Fowler, S. Blenkinsop, C. Tebaldi // International Journal of Climatology, Vol. 27, Issue 12, 2007. – P. 1547–1578. DOI: 10.1002/joc.1556.

97 Ghahreman N. Investigation of uncertainty in the IPCC AR5 precipitation and temperature projections over Iran under RCP scenarios/ N. Ghahreman, M. Tabatabaei, I. Babaeian // Conference: Common Future Under Climate Change International Scientific Conference, At Paris, France, 2015. – DOI: 10.13140/RG.2.1.1808.3683.

98 Ghasemi, E. Influence of climate change on runoff with approach of uncertainty of the atmosphere general circulation models / E. Ghasemi, A. Fattahi, O. Babai // Geographical study of dry area, vol. 13, 2013. – P. 37–53.

99 Gohari, A. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin / A. Gohari, S. Eslamian, J. Abedi-Koupaei, A. M Bavani, D. Wang, K. Madani // Science of the Total Environment Volume 442, 2013. – P. 405–419, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.029.

100 IPCC Expert Meeting on Assessing Climate Information for Regions, 2018. – P. 52.

101 Iran Topography and Morphology Map [Электронный ресурс] – site Synoptic Climatology. – Режимдоступа: [<http://synopticclimate.ir/post/1089>].

102 Istomin, E. P. Knowledge database in geoinformation management of the territory development / E.P. Istomin, V.M. Abramov, A.G. Sokolov, V. G. Burlov, L. S. Slesareva // International Multidisciplinary Scientific GeoConfer-

ence Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, vol. 17 (21), 2017. – P. 951–959. DOI: 10.5593/sgem2017/21/S07.120.

103 Kardavani, P. Water resources and problems in Iran / P. Kardavani. –TehranUniversity Press, 2008. – P. 237.

104 Karimi, R. Easy statistical analysis with SPSS / R. Karimi. – Hengam press, 2015. – P. 315.

105 Khatami, S. Benefits of GIS Application in Hydrological Modeling: A Brief Summary / S. Khatami, B. Khazai // VATTEN: Journal of Water Management and Research, vol. 70 (1), 2014. – P. 41–49.

106 Madani, K. Water management in Iran: what is causing the looming crisis? / K. Madani // Journal of Environmental Studies and Sciences, vol. 4, Issue 4, 2014. – P. 315–328. DOI: 10.1007/s13412-014-0182-z.

107 Mahmood, R. Assessment of Impacts of Climate Change on the Water Resources of the Transboundary Jhelum River Basin of Pakistan and India / R. Mahmood, S. Jia // Journal Water, vol. 8, Issue 6, 2016. – doi:10.3390/w8060246.

108 Massah, A.R. Workshop ” The importance of climate change in the world and its impact on different systems”/ A. R. Massah , P. S. Ashofteh. – 2007, Tehran, Iran.

109 McCuen, R. H. Modeling hydrologic change: statistical methods / R. H. McCuen. – LEWIS publishers Press, 2002. – P. 433.

110 Mesarovic, M. D. General Systems Theory: Mathematical Foundations / M. D. Mesarovic, Y. Takahara. – Academic Press INC New York, San Francisco, London, 1975. – P. 322.

111 Moiseev, N.N. Mathematical problems of system analysis / N.N. Moiseev. : Nauka, Moscow, 1981. – P. 468.

112 Najafi, M.R. Combined Effect of Global Climate Projection and Hydrologic Model Uncertainties on the Future Changes of Streamflow / M.R. Najafi, H. Moradkhani, I.W. Jung // World Environmental and Water Resources Congress, 2010. – P. 81–91.

- 113 Report of meteorological and climatological studies of catchment Karun. – Behan Sad Company, 2011. – P. 215.
- 114 Report of meteorological and climatological studies of catchment Sefidrud . – Mahab Ghodss consulting engineering company, 2012. – P. 290.
- 115 Sada, R. Potential Impacts of Climate Change on Hydrology of Western Siberian Lowland Catchments / R. Sada. – Master's Thesis, the KielUniversity, 2015. – P. 123.
- 116 Safavi, H.R. Engineering Hydrology (third edition) / H. R Safavi. – Isfahan University of Technology press, 2011. – P. 680 (In Persian).
- 117 Safavi, H.R. Study of Climate Change Effects on Meteorological and Hydrological Components / H.R. Safavi, M. Shishe frosh. – Second National Climate Conference, Building and Energy Conservation, Esfahan, 2013.
- 118 Skewness [Электронный ресурс]– Wikipedia. – Режим доступа: [<https://en.wikipedia.org/wiki/Skewness>].
- 119 Statistics How To [Электронныйресурс] – Statistical hand book site. – Режим доступа: [<http://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/chi-square/>].
- 120 Stevens, T. Future climate impacts on maize farming and food security in Malawi/ T. Stevens, K. Madani // Scientific Reports 6: 36241. – 2016. DOI: 10.1038/srep3624.
- 121 Surface water quality report (quantitative and qualitative) of catchment Karun. – Behan Sad Company, 2011. – P. 360.
- 122 Surface water quality report (quantitative and qualitative) of catchment Sefidrud . – Mahab Ghodss consulting engineering company, 2012. – P. 140.
- 123 The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), fact sheet, Department of Environment and Energy [Электронныйресурс] – 2014, P. 3. – Режимдоступа: [<https://www.environment.gov.au/system/files/resources/7dc97a72-cc89-455c-a39a-0a2a4bc39e8d/files/ipcc-fact-sheet.pdf>].

124 The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), The Scientific Basis of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 2001b.

125 Vogel, R.M. Flow Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals / R.M Vogel, M.N.Fennessey // Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 120, issue 4, 1994. – P. 485–504.

126 What is a Correlogram? [Электронный ресурс]– Statistical handbook site – Режим доступа: [<http://www.statisticshowto.com/correlogram/>].

127 Wood, A. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs / A. Wood, L.R. Leung, V. Sridhar, D.P. Lettenmaier // Journal Climatic Change, vol. 62, issue 1–3, 2004. – P. 189–216.

128 Zamani, R. Risk assessment of agricultural water requirement based on a multi-model ensemble framework, southwest of Iran / R. Zamani A.M. Akhond-Ali, A. Roozbahani, R. Fattahi // Journal Theoretical and Applied Climatology, vol. 129, issue 3-4, 2016. – P. 1109-1121. – DOI 10.1007/s00704-016-1835-5.

129 Zareian, M.A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale / M.J. Zareian, S. Eslamian, H. R. Safavi // Journal of Theoretical and Applied Climatology, vol. 122 issue 3-4, 2014. – P. 497–516. – DOI: 10.1007/s00704-014-1307-8.

130 Коваленко, В.В. О возможности учета испарения при моделировании процесса формирования многолетнего речного стока (на примере западной Африки) / В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Ф.Л. Соловьев, С.Э. Бонгу, А. Джалалванд // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 44, 2016. – С. 45–53.

131 Гайдукова, Е.В. Апробация методики долгосрочного прогнозирования статистических характеристик на речных бассейнах Ирана / Е.В. Гайдукова, А. Джалалванд, Л. Синкпеун // Международный научно-

исследовательский журнал, № 04 (58), Часть 1, 2017. – С. 80–86, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.58.117>.

132 Гайдукова, Е.В. Гидрологические характеристики многолетнего годового стока рек Сефидруд и Карун (Иран) / Е.В. Гайдукова, А. Джалалванд // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 46, 2017. – С. 21–28.

133 Гайдукова, Е.В. Построение карт распределения гидрологических характеристик при недостаточности данных с использованием ГИС-технологий / Е.В. Гайдукова, А. Джалалванд, В.М. Сакович // Естественные и технические науки, № 12 (126), 2018. – С. 177–180.

134 Джалалванд, А. Методы расчета испарения с водосборов рек Сефидруд и Карун (Иран) / А. Джалалванд // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований», посвященной 220-летию выдающегося русского мореплавателя, географа, вице-председателя Русского географического общества Ф.П. Литке в рамках XIII Большого географического фестиваля. – СПб: Свое издательство, 2017. – С. 254–259.

135 Судакова, Н.В. Построение двумерных гистограмм для рек Западной Африки / Н.В. Судакова, С.Э. Бонгу, А. Джалалванд // Вода – источник жизни на Земле: материалы IX-й всероссийской научной экологической конференции школьников и студентов, посвященной Всемирным дням Воды и Земли. – СПб., 2016. – С. 86–87.

136 Джалалванд, А. Гидрологические характеристики стока рек Сефидруд и Карун (Иран) / А. Джалалванд // Вода – источник жизни на Земле: материалы IX-й всероссийской научной экологической конференции школьников и студентов, посвященной Всемирным дням Воды и Земли. – СПб., 2017. – С. 38–39.

137 Kovalenko, Viktor V. Joint assessment of the probability characteristics of long-term river run-off and evaporation in today's climate conditions

and in the expected changes / Viktor V. Kovalenko, Ekaterina V. Gaidukova, H. Diawara, E. Bongu, A. Jalalvand // International Journal of Engineering Research And Management (IJERM), ISSN: 2349-2058, Volume-03, Issue-06, 2016. – P. 83–86.

138 Коваленко, В.В. Учет испарения при моделировании процесса формирования речного стока в Западной Африке / В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, С.Э. Бонгу, А. Джалалванд // Материалы III Международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике», г. Ростов-на-Дону, 2016. – С. 86–95.

139 Гайдукова, Е.В. Совместная оценка вероятностных характеристик многолетнего речного стока и испарения в условиях современного климата и ожидаемых его изменений / Е.В. Гайдукова, С.Э. Бонгу, А. Джалалванд, Х. Диавара // Евразийское Научное Объединение, т. 2, № 7 (41), 2018. – С. 139–141.

140 Джалалванд, А. Применение методов пространственной интерполяции к гидрологическим данным на примере водосбора р. Карун (Иран) / А. Джалалванд, Е.В. Гайдукова, В.Г. Бурлов, А.М. Ахондали // Международный научно-исследовательский журнал, № 02 (80), 2019. – С. 37–42, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.80.2.006>.

141 Бурлов, В.Г. Разработка модели системы контроля и управления доступом в органе государственного управления / В.Г. Бурлов, А.М. Бровкин, Е.В. Краеваев, А. Джалалванд // Сборник трудов V международной научно-практической конференции ИНФОГЕО 2018 «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий». – СПб: РГГМУ, 2018. – С. 179–185.

142 Гайдукова, Е.В. Выявление аномальных зон формирования речного стока для водозависимых отраслей экономики Ирана при изменении климата / Е.В. Гайдукова, А. Джалалванд /// Сборник трудов V международной научно-практической конференции ИНФОГЕО 2018 «Геоин-

формационное обеспечение устойчивого развития территорий». – СПб: РГГМУ, 2018. – С. 28–32.

143 Бурлов, В.Г. Разработка модели управления процессами обеспечения безопасности веб-сайта / В.Г. Бурлов, Е.Ю. Костаева, А. Джалалованд, // Сборник трудов V международной научно-практической конференции ИНФОГЕО 2018 «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий». – СПб: РГГМУ, 2018. – С. 193–198.

Приложение А – Оценка гидрометеорологических условий Ирана

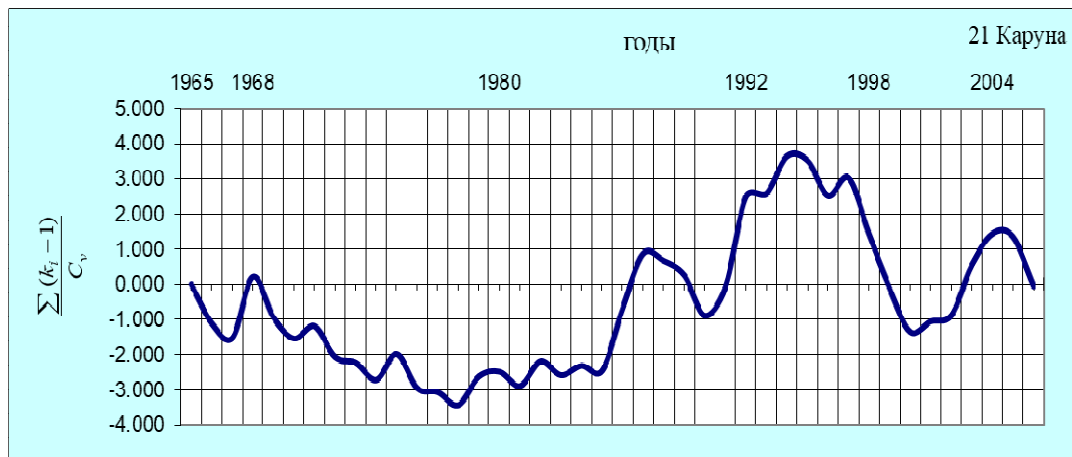


Рисунок А.1 – Разностно-интегральная кривая *Behsht Abad* р. Карун.

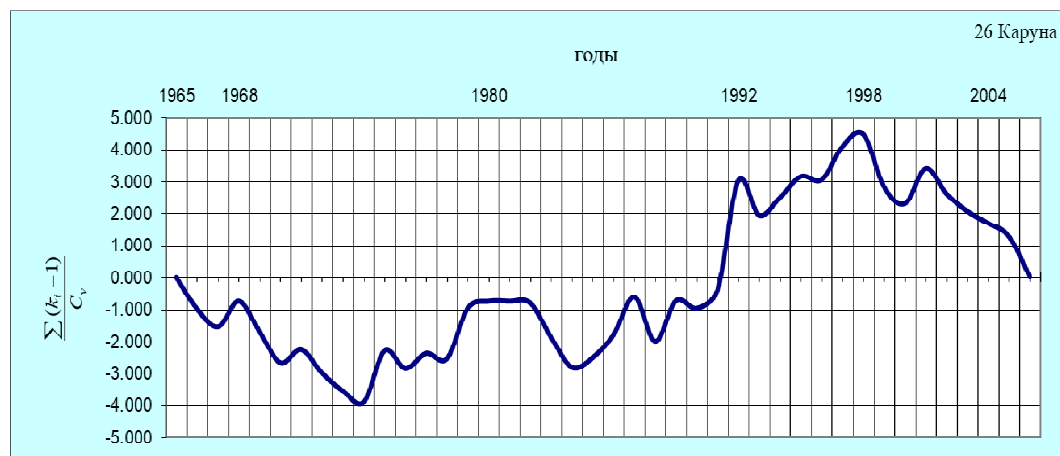


Рисунок А.2 – Разностно-интегральная кривая *Dashte bozorg* р. Карун.

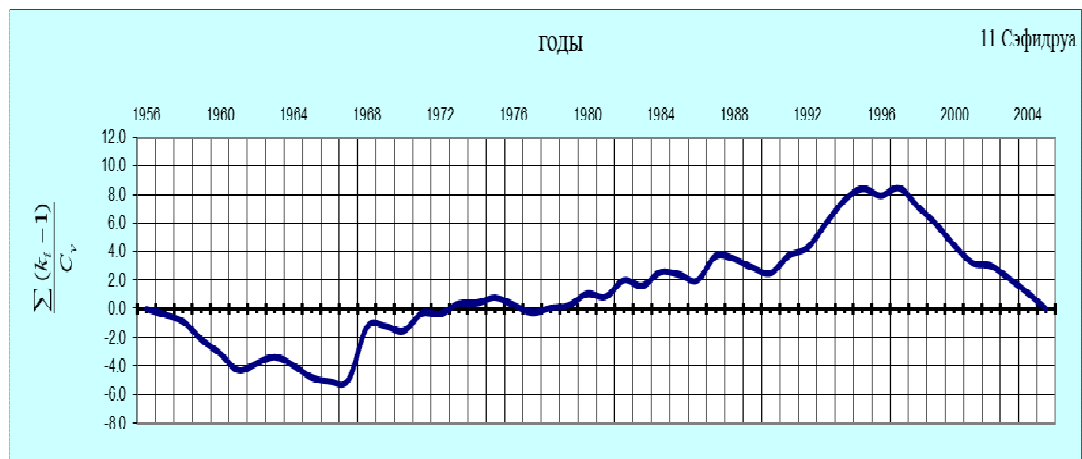


Рисунок А.3 – Разностно-интегральная кривая *Moter Khane* р. Сефидруд.

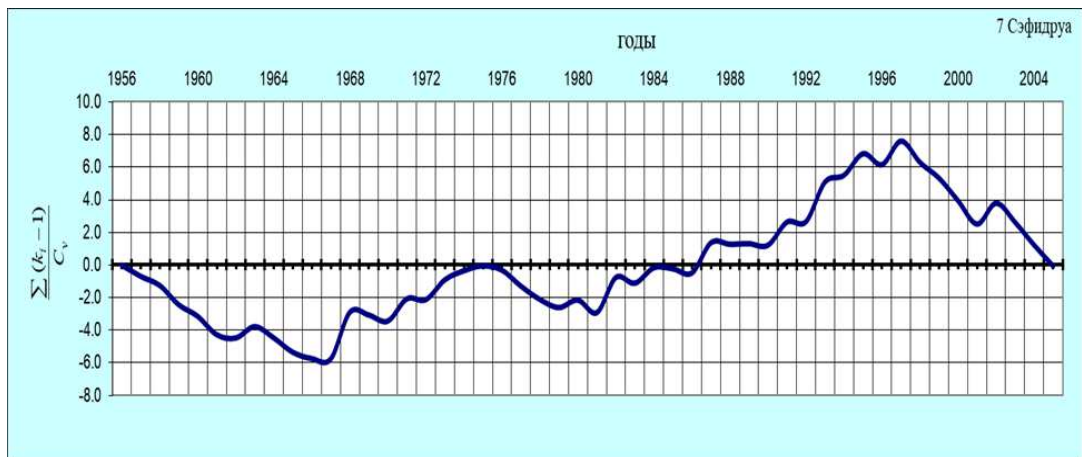


Рисунок А.4 – Разностно-интегральная кривая *Sarcham* р. Сефидруд.

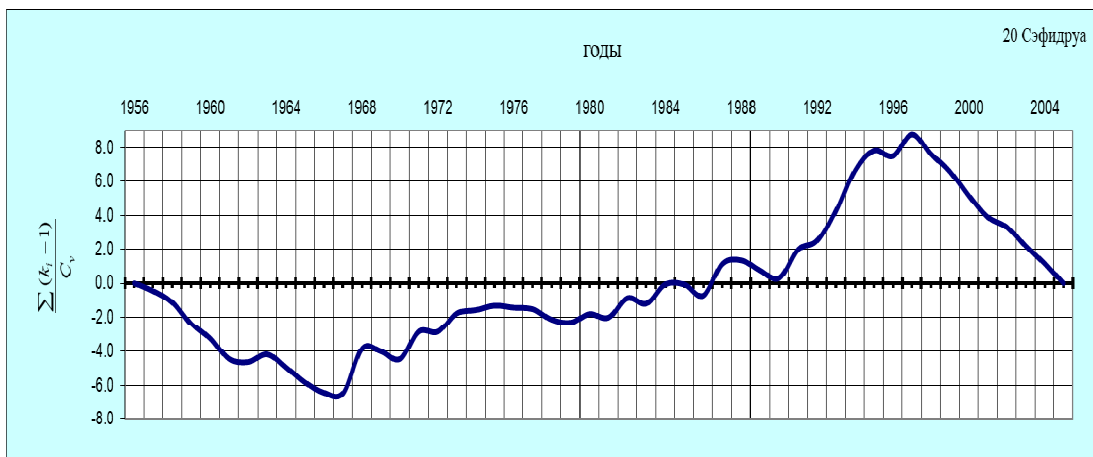


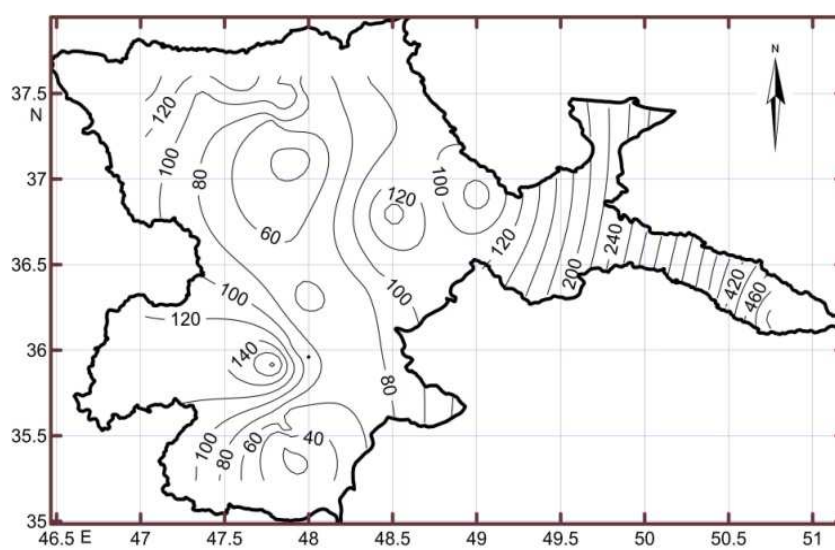
Рисунок А.5 – Разностно-интегральная кривая *Mahneshan* р. Сефидруд.

Таблица А.1 – Рассчитанные гидрологические характеристики рек Ирана

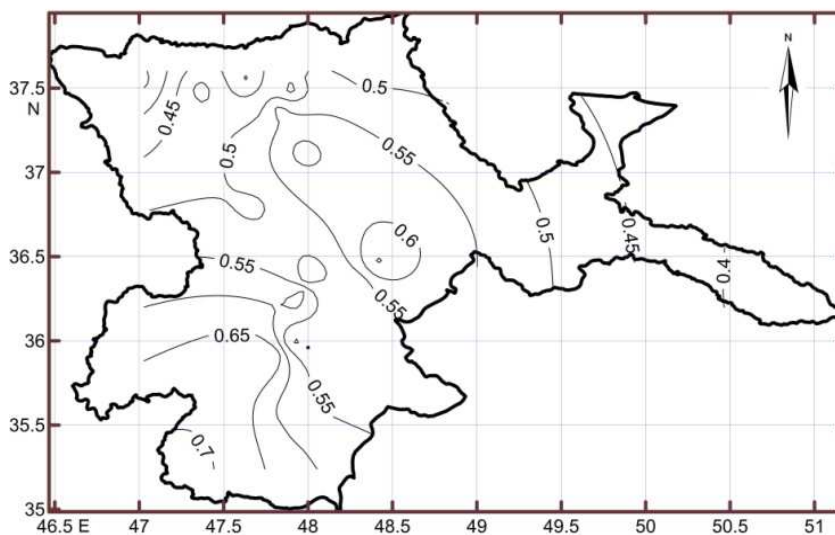
Станция	F , км ²	h , мм	C_v	C_s	$r(1)$	k	β
Бассейн р. Сефидруд							
<i>Binalud</i>	5078	100	0,48	0,75	0,15	0,32	0,79
<i>Telvar– Salamat Abad</i>	6770	38	0,56	1,24	0,37	0,12	1,76
<i>Hashtad Joft</i>	1825	68	0,61	1,30	0,31	0,21	1,50

Примечание: F – площадь, h – слой стока, C_v – коэффициент вариации, C_s – коэффициент асимметрии, $r(1)$ – коэффициент автокорреляция при годовой сдвиге, k – коэффициент стока, β – критерий устойчивости.

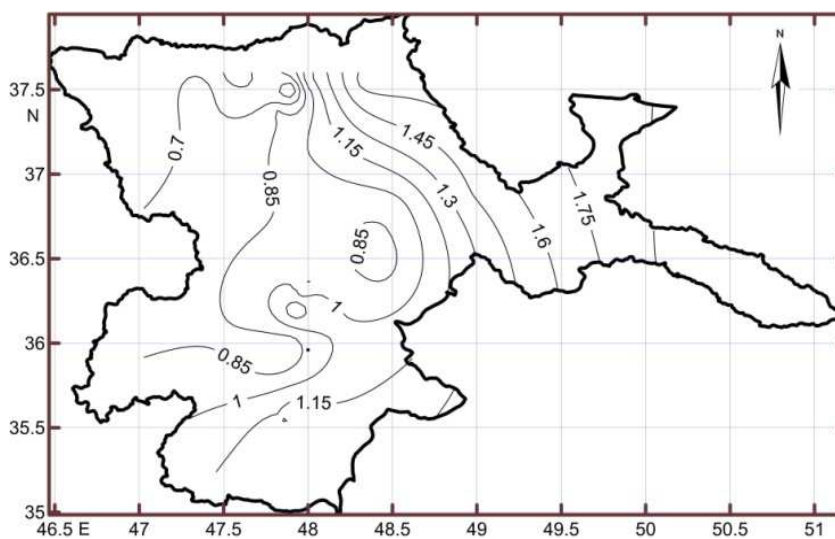
a)



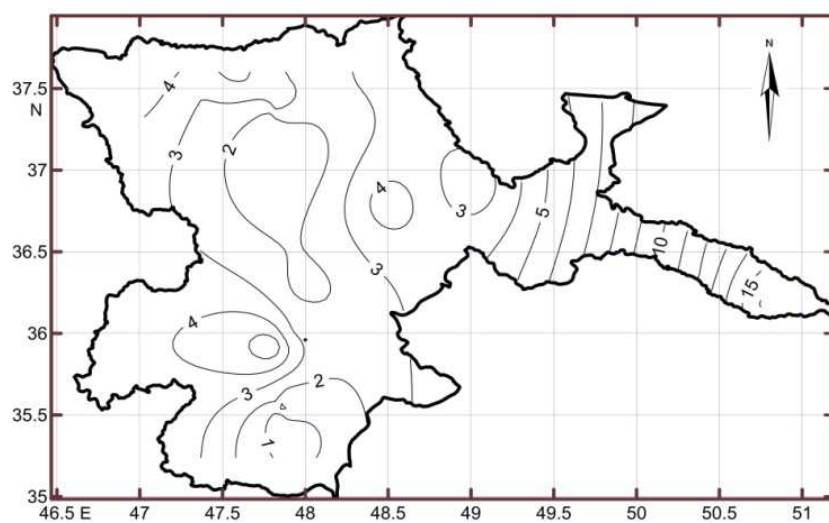
б)



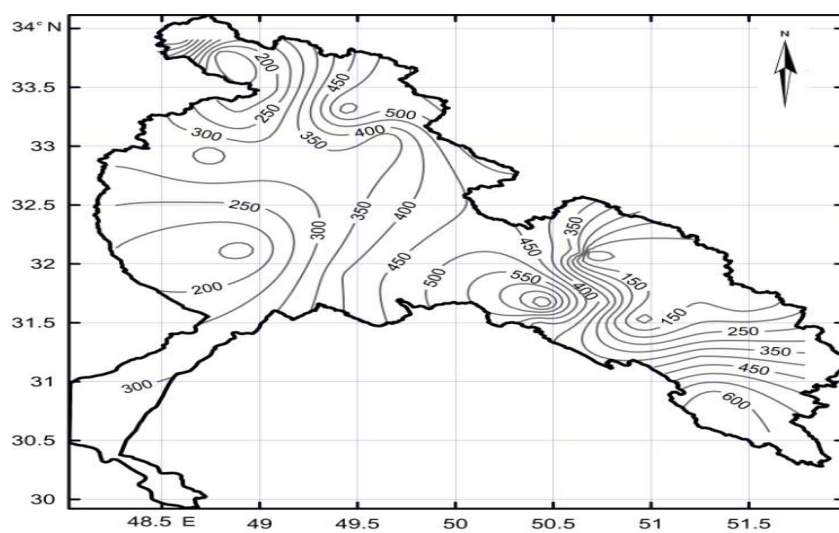
в)



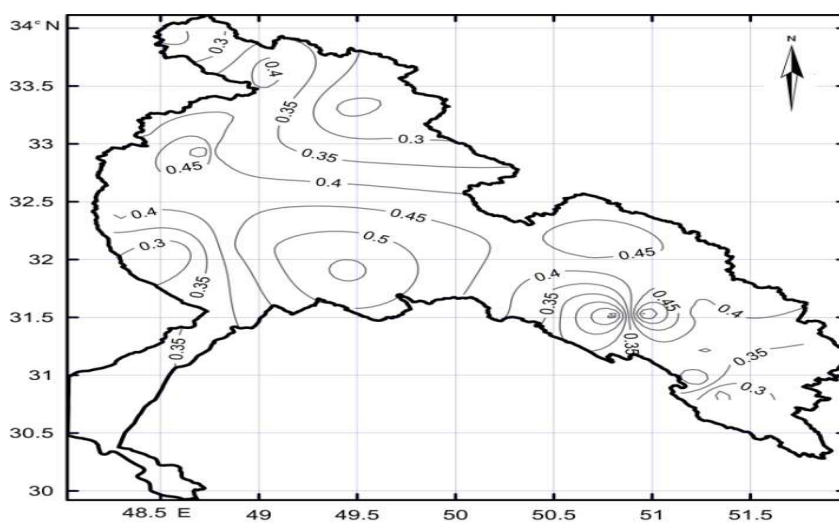
c)



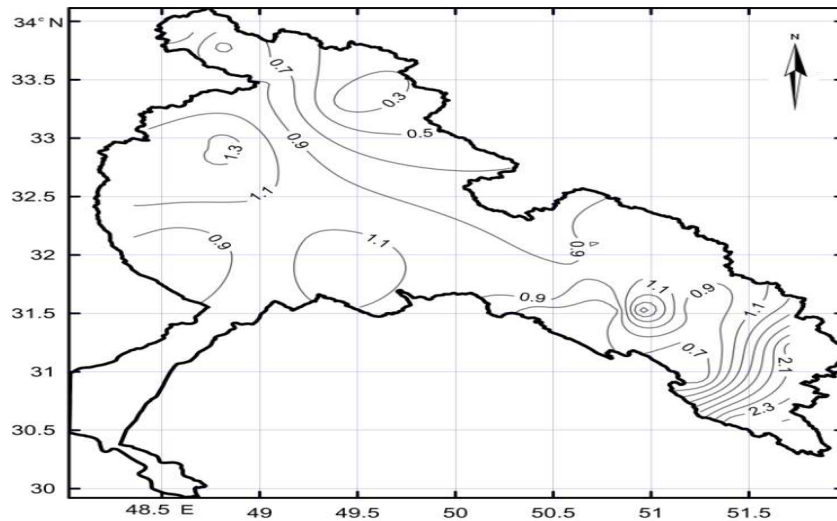
d)



e)



жс)



з)

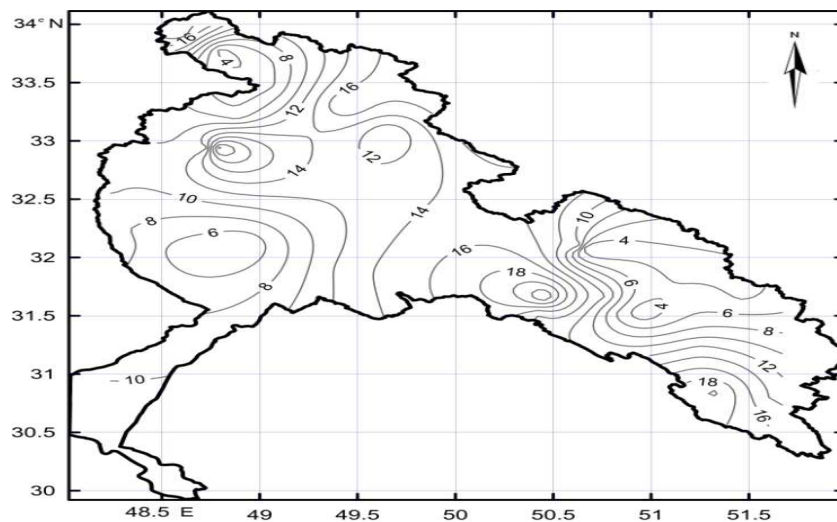


Рисунок А.6 – Карты распределения слоя стока, C_v , C_s и модуля стока для бассейнов Сефидруд (а, б, в, г) и Карун (д, е, ж, з).

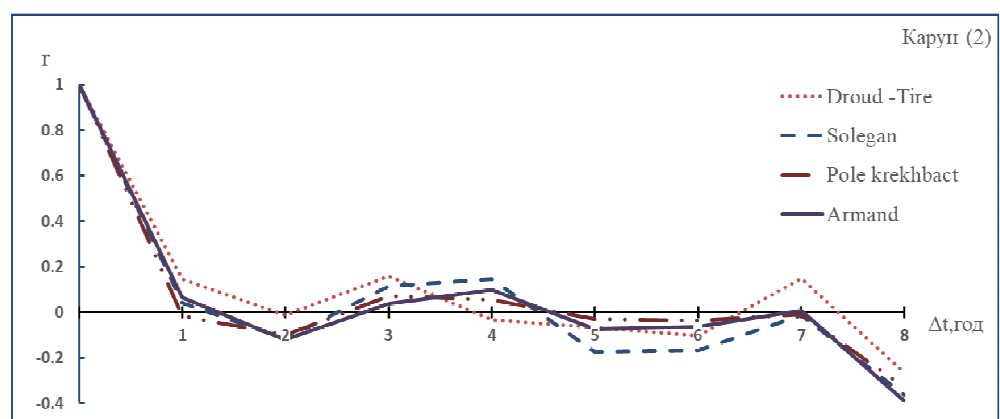


Рисунок А.7 – Автокорреляционная функция (коррелограм) *Dorud-tire*, *Solegan*, *Pole Krakhbast*, *Armand*. Карун

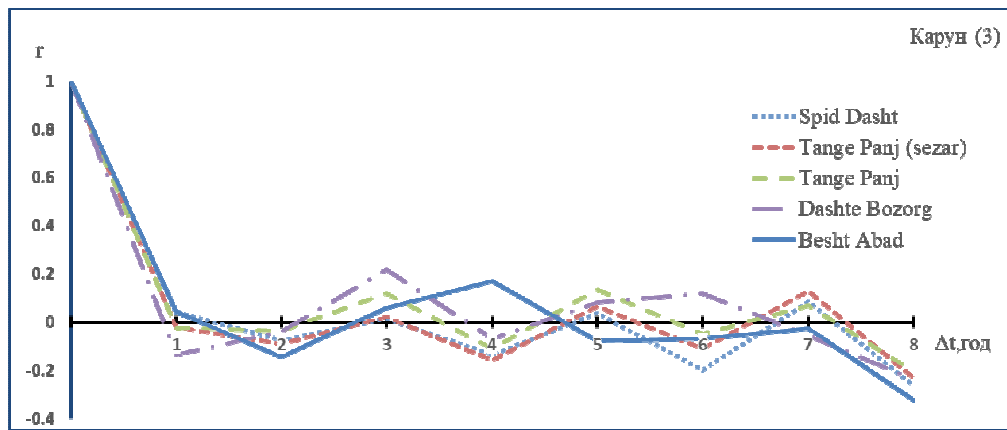


Рисунок А.8 – Автокорреляционная функция (коррелограм) *Sepid Dashte*, *Tange Panj (Sezar)*, *Tange Panj*, *Dashte Bozorg* и *Behsht Abad*р. Карун

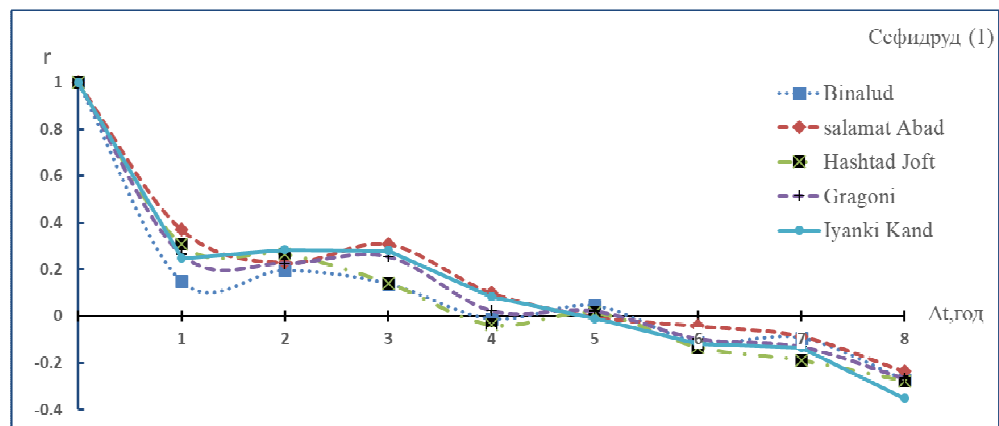


Рисунок А.9 – Автокорреляционная функция (коррелограм) *Binalud*, *SalamatAbad*, *HashtadJoft* и *Gragoni* и *Iyanki Kand* р. Сефидруд

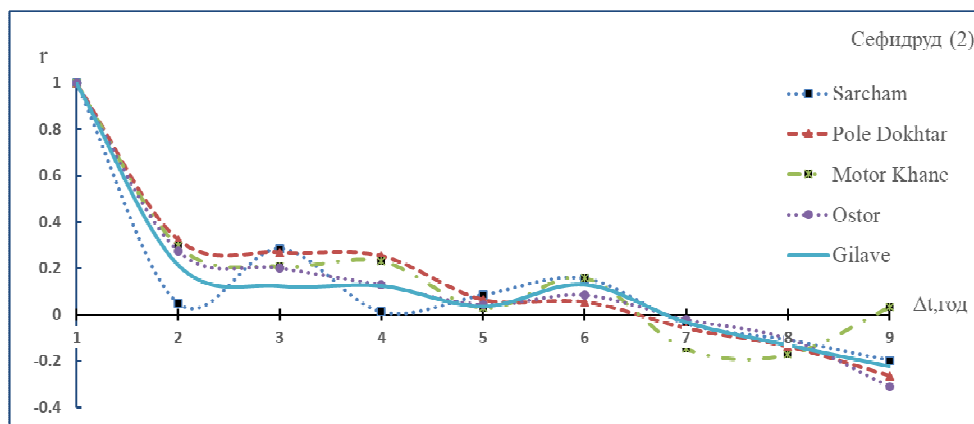


Рисунок А.10 – Автокорреляционная функция (коррелограм) *Sarcham*, *Pole Dokhtar*, *Mahneschan Ostor* и *Gilave* р. Сефидруд

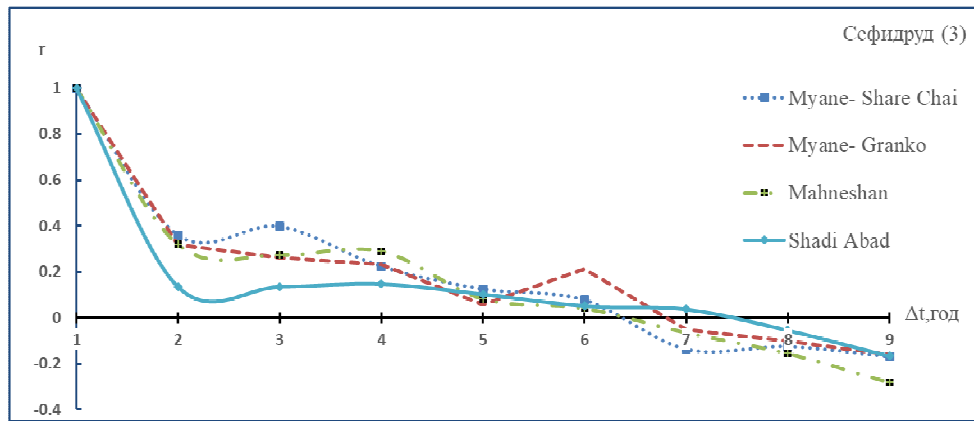


Рисунок А.11 – Автокорреляционная функция (коррелограм) *Myane (Share Chai)*, *Myane -Granko*, *Mahneshan*, и *ShadiAbad* р. Сефидруд

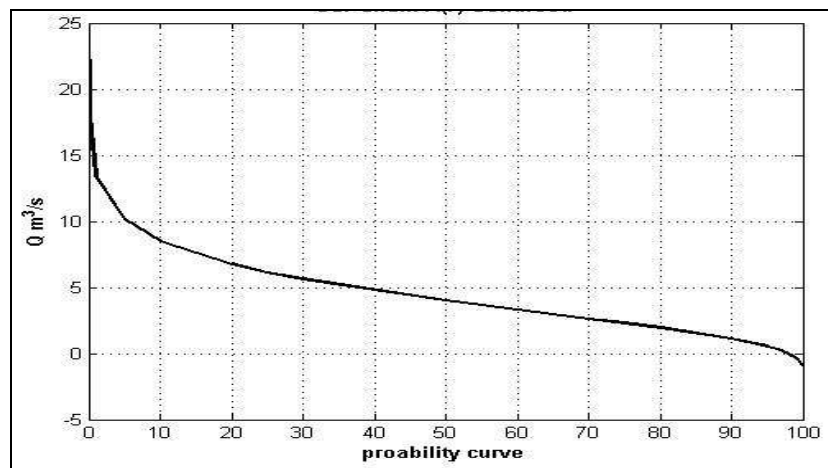


Рисунок А.12 – Кривая обеспеченности, станция *Sarcham*

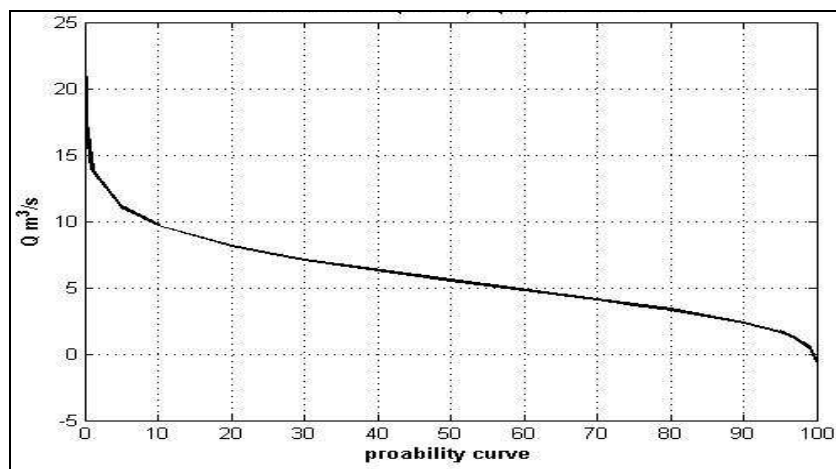


Рисунок А.13 – Кривая обеспеченности, станция *Share Chai*

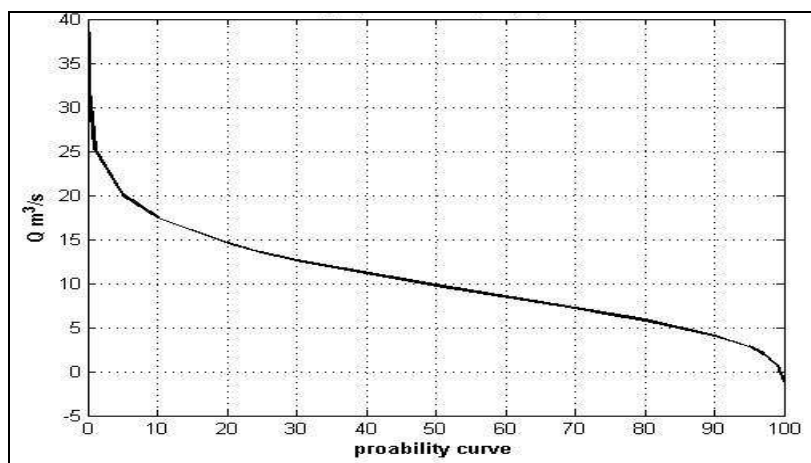
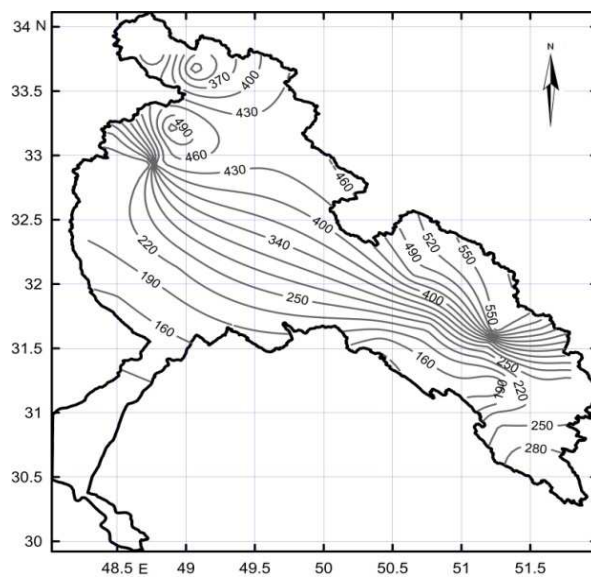
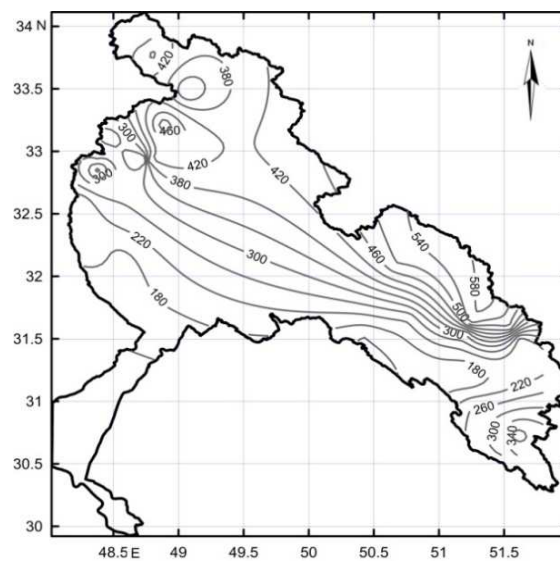


Рисунок А.14 – Кривая обеспеченности, станция *Salamat Abad*

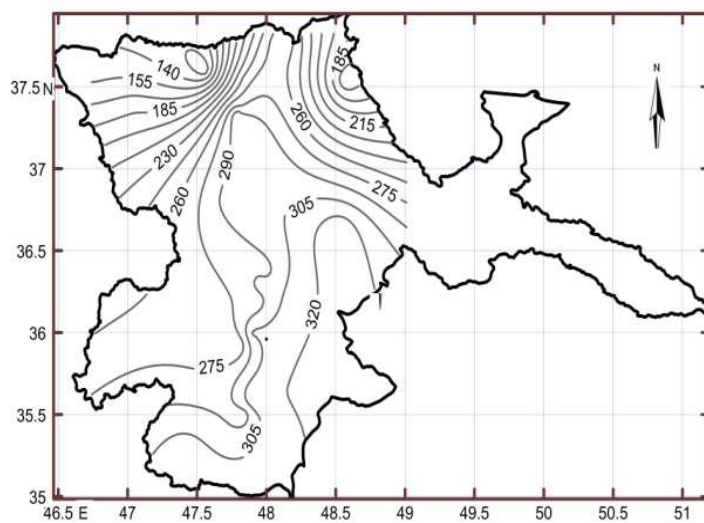
a)



b)



б)



в)

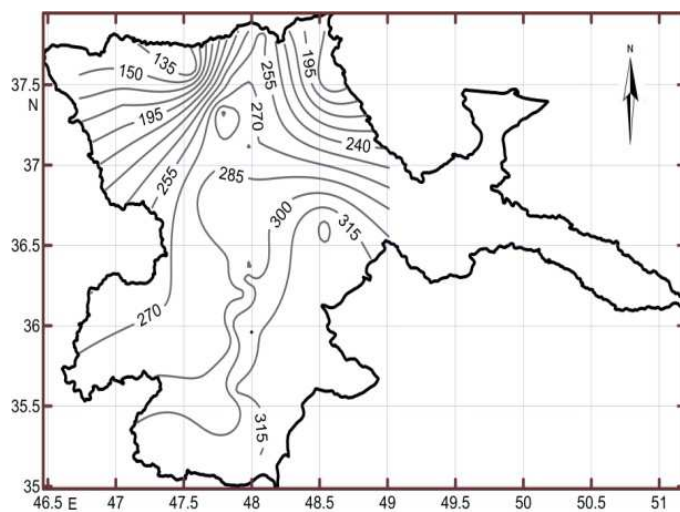


Рисунок А.15 – Испарения по первому методу (а, в) и по второму методу (б, г).

Приложение Б – Материалы к оценке гидрологических последствий изменения климата в речных бассейнах Ирана

Таблица Б.1 – Результаты поверочных прогнозов при оценке критерием χ^2

Гидрологический пост	Прямой прогноз		Обратный прогноз	
	5 % у.з.	10 % у.з.	5 % у.з.	10 % у.з.
Бассейн реки Карун				
<i>Patave</i>	+	+	+	+
<i>Kata</i>	—	—	+	+
<i>Pole Krakhbast</i>	—	—	+	+
<i>Soleqan</i>	—	—	+	+
<i>Kohe Sokhte</i>	—	—	+	+
<i>Behesht Abad</i>	—	—	+	+
<i>Barez</i>	+	+	+	+
<i>Armand</i>	+	+	+	+
<i>Rahim Abad</i>	+	+	—	—
<i>Dorud (Tire)</i>	+	+	—	—
<i>Sepid Dashte Sezar</i>	+	+	+	+
<i>Tange Panj-e Sezar</i>	+	+	+	+
<i>Tange Panj</i>	+	+	+	+
<i>Dashte Bozorg</i>	—	—	+	+
Бассейн реки Сефидруд				
<i>Binalud</i>	+	+	—	—
<i>Salamat Abad</i>	+	+	—	—
<i>Gamishqan (Hashtad</i>	+	+	—	—
<i>Graqoni</i>	+	+	—	—
<i>Iyanki Kand</i>	+	+	+	+
<i>Sarcham</i>	+	+	+	+
<i>Pole Dokhtar</i>	+	+	—	—
<i>Iqdomosh (Motor</i>	—	—	+	+
<i>Octor</i>	+	+	+	+
<i>Shadi Abad</i>	+	+	—	—
<i>Mahneshan</i>	+	+	—	—
<i>Myane Shari chai</i>	—	—	+	+
<i>Myane Gharnqho</i>	—	—	+	+
<i>Gilave</i>	+	+	+	+

Таблиц Б.2 – Средние многолетние изменения месячного количества осадков в бассейне р. Карун (%)

Карун														
Пункт	РТК	период	Зима			Весна			Лето			Осень		
			Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Dashte Bozorg	РТК 2,6	2020-2049	2,1	3,7	10,2	-21,9	-30	160	-55,1	149	0,0	-6,3	5,8	38,0
		2050-2079	-5,4	25,6	25,4	10,6	-38,5	182	-69	55,4	0,0	99,9	36,1	44,0
	РТК 8,5	2020-2049	-29,0	39,4	39,4	-17,3	-12,2	413,7	-36,3	65,1	0,0	42,9	19,7	41,0
		2050-2079	-38,1	-37,8	-1,5	37,4	273	287	1490	137	0,0	61,8	40,0	-18,5
Armand	РТК 2,6	2020-2049	1,6	3,2	5,6	-0,7	11,6	-11,4	-52,7	253,6	129,2	2,6	23,2	26,2
		2050-2079	-7,9	13,6	19,2	17,2	17,3	-4,9	-57,5	68,7	-36,9	99,0	43,8	40,2
	РТК 8,5	2020-2049	-23,3	17,9	22,2	-7,9	12,6	-12,5	-47,9	8,7	2939	97,0	47,0	40,7
		2050-2079	-2,4	-6,5	0,5	-7,8	29,8	-2,1	-76,0	67,6	352	93,1	38,5	19,7
Barez	РТК 2,6	2020-2049	-2,0	9,6	3,6	-6,7	11,6	-46,9	-40,8	65,2	239,7	19,6	25,9	20,6
		2050-2079	-8,6	23,1	17,7	11,9	10,9	-21,1	-52,2	10,3	7,3	149,3	42,5	39,1
	РТК 8,5	2020-2049	-23,0	25,4	24,0	-14,6	8,0	32,9	-45,1	10,0	2683	119,5	23,8	43,8
		2050-2079	-4,9	-2,8	-0,7	-7,9	22,1	-19,5	-59,2	69,6	773	103	22,0	23,4
Dashte Bozorg	РТК 2,6	2020-2049	2,1	3,7	10,2	-21,9	-30	160	-55,1	149	0,0	-6,3	5,8	38,0
		2050-2079	-5,4	25,6	25,4	10,6	-38,5	182	-69	55,4	0,0	99,9	36,1	44,0
	РТК 8,5	2020-2049	-29,0	39,4	39,4	-17,3	-12,2	413,7	-36,3	65,1	0,0	42,9	19,7	41,0

Продолжение таблицы Б.2

		2050-2079	-38,1	-37,8	-1,5	37,4	273	287	1490	137	0,0	61,8	40,0	-18,5
<i>Armand</i>	PTK 2,6	2020-2049	1,6	3,2	5,6	-0,7	11,6	-11,4	-52,7	253,6	129,2	2,6	23,2	26,2
		2050-2079	-7,9	13,6	19,2	17,2	17,3	-4,9	-57,5	68,7	-36,9	99,0	43,8	40,2
	PTK 8,5	2020-2049	-23,3	17,9	22,2	-7,9	12,6	-12,5	-47,9	8,7	2939	97,0	47,0	40,7
		2050-2079	-2,4	-6,5	0,5	-7,8	29,8	-2,1	-76,0	67,6	352	93,1	38,5	19,7
<i>Barez</i>	PTK 2,6	2020-2049	-2,0	9,6	3,6	-6,7	11,6	-46,9	-40,8	65,2	239,7	19,6	25,9	20,6
		2050-2079	-8,6	23,1	17,7	11,9	10,9	-21,1	-52,2	10,3	7,3	149,3	42,5	39,1
	PTK 8,5	2020-2049	-23,0	25,4	24,0	-14,6	8,0	32,9	-45,1	10,0	2683	119,5	23,8	43,8
		2050-2079	-4,9	-2,8	-0,7	-7,9	22,1	-19,5	-59,2	69,6	773	103	22,0	23,4
<i>Kohe Sokhte</i>	PTK 2,6	2020-2049	3,4	2,7	6,2	0,7	15,0	-9,0	6,5	170,8	-53,9	4,2	50,9	29,0
		2050-2079	-6,0	11,9	16,1	19,8	26,0	-4,4	-28,8	50,7	-62,4	91,3	51,6	41,9
	PTK 8,5	2020-2049	-24,8	17,5	19,9	-4,9	17,1	6,4	-3,4	-15,0	-51,3	86,6	14,0	39,4
		2050-2079	-2,6	-6,5	0,4	-6,4	38,4	8,7	-30,8	76,1	-68,5	85,8	34,1	19,2
<i>Behsht Abad</i>	PTK 2,6	2020-2049	3,8	2,9	6,1	-23,7	8,1	-15,4	9,6	153,8	256	3,6	38,8	29,3
		2050-2079	-5,7	11,3	15,3	13,6	18,7	5,1	-27,8	38,7	55,9	83,8	50,7	41,5
	PTK 8,5	2020-2049	-24,6	17,2	18,9	-22,0	11,1	84,1	-5,3	-24,1	4063	77,5	24,1	38,6
		2050-2079	-2,2	-6,6	0,0	-22,8	33,4	10,3	-30,8	48,3	41	78,2	45,5	18,7
<i>Patave</i>	PTK 2,6	2020-2049	-2,8	13,4	3,6	-7,2	12,6	-44,9	-43,4	61,8	107	18,6	22,0	16,8
		2050-2079	-7,8	26,1	15,9	10,8	11,0	-9,3	-51,4	3,4	19,1	112,2	38,7	36,4
	PTK 8,5	2020-2049	-20,4	27,2	23,9	-15,5	9,5	-26,4	-49,2	26,0	1122	73,9	22,0	41,6
		2050-2079	-5,2	-0,3	-1,2	-7,5	19,4	-36,8	-61,2	49,0	419	71,9	15,5	23,7
<i>Tange Panj</i>	PTK 2,6	2020-2049	4,0	2,6	0,0	-2,6	3,9	12,6	34,8	42,8	39,4	1,1	29,7	24,7
		2050-2079	-5,6	8,8	13,2	10,8	8,8	15,0	-24,5	7,9	26,5	54,0	51,1	32,5
	PTK 8,5	2020-2049	-15,7	19,5	17,1	-7,6	9,5	30,5	8,4	-4,5	345	34,1	27,1	33,7

Продолжение таблицы Б.2

		2050-2079	4,5	-7,7	-6,1	-12,3	12,9	38,7	1,2	53,1	86,8	39,0	57,2	16,0
<i>Tange Panj Sezar</i>	PTK 2,6	2020-2049	6,7	2,9	-1,0	-3,4	11,7	13,4	-55	111	9,3	38,1	20,4	33,3
		2050-2079	-3,5	12,1	14,9	8,1	14,4	22,2	-64	37,0	-1,7	95,4	35,8	31,8
	PTK 8,5	2020-2049	-20,8	27,5	22,3	-10,3	9,3	34,3	-50	42,8	1293	43,8	19,8	29,2
		2050-2079	-2,8	-8,2	-5,1	-8,7	16,5	48,9	-53	123	426	46,7	39,9	19,5
<i>Dorud - Tire</i>	PTK 2,6	2020-2049	11,7	1,4	-3,5	-11,4	3,4	22	-13	-42	-8,9	-5,4	16,9	31,5
		2050-2079	2,9	6,4	10,1	3,9	5,8	48,5	-42	-34,2	-29,8	31,5	29,6	24,8
	PTK 8,5	2020-2049	-15,5	13,9	11,6	-10,5	-0,9	65,1	-33	-62,0	1004	20,0	13,8	24,1
		2050-2079	-4,0	-7,3	-12,2	-17,6	5,7	95,7	-33	-42,4	333	29,4	41,6	16,4
<i>Rahim Abad</i>	PTK 2,6	2020-2049	17,2	1,3	-3,8	-22,2	2,7	15,3	-10	-48	-24	-1,7	9,8	33,7
		2050-2079	11,4	5,9	9,7	0,1	3,1	39,2	-41,9	-34,3	-37,3	29,3	27,5	25,5
	PTK 8,5	2020-2049	-13,6	13,9	10,9	-12,9	-5,9	51,9	-33	-67,6	1065	17,5	5,1	25,2
		2050-2079	-5,4	-7,2	-13,4	-23,9	3,2	76,2	-32	-46,9	389	25,7	40,7	18,3
<i>Sepia dash Sezar</i>	PTK 2,6	2020-2049	9,1	1,3	-3,1	-7,8	4,5	20,9	-31	22,2	2,5	-5,7	20,9	32,3
		2050-2079	-0,8	6,3	9,8	6,0	8,7	34,3	-47	-7,5	-38,5	40,3	29,2	26,3
	PTK 8,5	2020-2049	-17,6	15,7	12,7	-9,6	4,5	56,0	-43	-30,9	1106	29,2	21,1	24,0
		2050-2079	-3,4	-7,6	-10,8	-14,9	8,3	76,8	-473	11,2	319	36,7	38,6	15,7
<i>Solegan</i>	PTK 2,6	2020-2049	-0,8	4,1	3,9	-3,9	9,3	-30	-28,8	-16	786	9,3	21,5	22,7
		2050-2079	-9,5	16,7	18,5	15,4	13,8	-15	-46,0	-9,5	37,3	112	43,4	39,4
	PTK 8,5	2020-2049	-23,0	18,3	22,1	-10,3	9,8	49	-35,9	-29	9245	101	54,0	42,2
		2050-2079	-3,3	-5,2	-0,5	-8,7	25,8	-7,5	-57,8	78	1710	95,2	32,3	21,7
<i>Kata</i>	PTK 2,6	2020-2049	-2,5	8,7	2,3	-6,9	11,6	-38,3	-45,6	34,9	273	21,1	24,0	18,0
		2050-2079	-9,6	21,2	15,9	11,0	10,8	-14,4	-53,4	-2,6	-13,4	150	40,3	37,6
	PTK 8,5	2020-2049	-23,1	23,1	20,9	-13,1	6,7	2,7	-54,6	15,3	3082	120	22,7	40,7

Продолжение таблицы Б.2

		2050-2079	-5,7	-1,1	-2,2	-7,9	22,8	-25,7	-68,0	51,9	1086	106	20,6	23,4
<i>Pole Krakhbas t</i>	РТК 2,6	2020-2049	-0,8	3,8	3,9	-3,3	9,6	-20,3	-33,2	131	794	9,5	33,2	22,7
		2050-2079	-9,5	16,6	18,0	16,0	14,7	-10,8	-48,3	21,4	23,2	110	45,1	39,5
	РТК 8,5	2020-2049	-23,1	17,9	21,8	-9,4	10,3	-26,7	-39,7	3,7	9492	100	20,0	42,0
		2050-2079	-3,3	-5,1	-0,6	-8,2	26,6	-18,0	-62,3	55,1	1748	94,5	26,8	21,8

Таблиц Б.3– Средние многолетние изменения месячного количества осадков в бассейне р. Сефидруд

Пункт	РТК	Период	Зима			Весна			Лето			Осень		
			Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
<i>Octor</i>	РТК 2,6	2020-2049	12,3	7,8	2,1	22,3	7,1	-16,0	61,5	43,2	51,6	-2,7	20,2	-3,3
		2050-2079	4,4	18,8	12,3	18,4	6,2	0,9	-1,1	13,5	60,3	10,2	27,4	10,0
	РТК 8,5	2020-2049	4,2	13,2	12,2	3,4	7,0	-3,7	24,4	3,2	72,7	5,1	-2,5	22,4
		2050-2079	21,6	10,1	-5,6	6,5	8,6	-0,6	34,8	10,8	22,4	8,9	20,8	28,0
<i>Igdomosh (Motor Khane)</i>	РТК 2,6	2020-2049	13,0	4,8	3,8	10,8	3,1	-2,7	69,4	0,0	0,0	-4,7	41,2	-5,1
		2050-2079	7,2	16,0	8,3	13,3	-5,8	27,6	6,5	0,0	0,0	10,4	48,9	9,1
	РТК 8,5	2020-2049	6,9	13,7	10,5	-6,1	-1,1	11,1	25,2	0,0	0,0	3,4	2,5	19,8
		2050-2079	21,0	8,3	-2,9	-7,3	-5,4	17,2	52,6	0,0	0,0	8,5	19,5	29,3
<i>Pole Dokhtar</i>	РТК 2,6	2020-2049	11,8	14,2	4,4	33,3	6,2	-6,5	64,3	33,8	48,4	-2,1	9,3	-2,8
		2050-2079	2,9	9,3	14,4	24,2	0,8	26,3	-9,2	4,1	63,0	11,0	19,0	9,9

Продолжение таблицы Б.3

	PTK 8,5	2020-2049	1,8	6,8	16,9	10,6	1,1	15,1	27,9	-21,2	68,3	4,3	-5,2	23,0
		2050-2079	21,2	-1,2	-3,6	16,9	2,1	23,3	34,2	-2,6	23,4	9,6	20,7	27,9
Binalud	PTK2,6	2020-2049	19,9	11,1	12,7	35,2	7,2	-17,7	38,7	16,0	41,0	10,0	11,0	-10,1
		2050-2079	9,8	30,4	16,5	22,0	-7,2	-8,9	-26,1	-14,3	70,8	12,6	20,4	13,1
	PTK 8,5	2020-2049	4,6	24,9	26,2	7,9	-9,0	-13,9	14,2	-45,2	98,5	-3,5	-3,2	29,7
		2050-2079	34,7	17,8	7,7	16,3	-9,2	-21,1	2,6	-18,9	73,2	12,5	24,6	33,1
	Shadi Abad	PTK 2,6	2020-2049	12,6	-5,6	-3,2	-22,0	4,8	0,9	106	9,8	81,1	36,6	16,3
2050-2079			5,9	-1,1	7,5	-1,3	-3,6	51,5	3,7	-11	135	15,4	8,0	16,3
PTK 8,5		2020-2049	-4,4	0,6	4,1	-6,5	-7,8	34,3	72,4	-42,7	134	-21,4	8,2	22,1
		2050-2079	-4,0	-11,2	-16,6	-23,5	-4,7	60,4	85,1	-30,4	51,8	16,9	26,0	17,7
Iyanki Kand	PTK 2,6	2020-2049	9,9	9,9	0,6	28,8	2,8	5,9	148,6	35,9	0,0	-1,9	12,8	2,6
		2050-2079	3,4	18,8	4,7	24,3	0,4	77,1	-6,4	4,6	0,0	10,2	13,1	10,2
	PTK 8,5	2020-2049	2,9	10,0	-0,8	11,8	0,9	36,6	70,0	-31,2	0,0	2,2	4,5	22,8
		2050-2079	14,6	9,8	-8,6	15,0	3,3	64,9	83,6	-2,3	0,0	8,2	20,6	30,7
Sarcham	PTK 2,6	2020-2049	17,4	4,8	3,5	8,0	-1,0	-10,6	53,0	88,2	43,2	-5,5	10,5	15,4
		2050-2079	15,1	10,9	8,5	13,7	3,3	15,5	3,2	36,5	49,5	6,2	15,8	6,6
	PTK 8,5	2020-2049	13,9	8,2	7,8	-5,3	5,6	9,1	22,2	-11,2	47,8	4,1	-0,2	15,5
		2050-2079	25,5	1,5	-3,3	-4,4	2,9	10,2	19,9	20,6	14,0	6,0	15,9	23,1
Salamat Abad	PTK 2,6	2020-2049	4,6	11,3	-2,7	30,0	12,3	-11,3	107	17,0	64,6	4,1	8,8	1,4
		2050-2079	-5,7	8,2	7,6	23,3	10,1	16,6	7,5	-7,0	94,3	11,7	8,9	-2,0
	PTK 8,5	2020-2049	-7,6	4,8	3,7	6,1	10,8	17,2	67,7	-37,3	93,6	1,2	1,6	9,1
		2050-2079	3,6	-6,3	-15,6	14,0	10,9	21,5	86,3	-19,4	36,9	13,6	23,9	8,0
Gragoni	PTK 2,6	2020-2049	10,6	19,8	-0,7	37,6	7,3	-1,3	77,0	15,7	46,7	1,9	-10,5	0,9

Продолжение таблицы Б.3

		2050-2079	1,0	4,2	14,1	26,9	-1,6	39,9	-16,5	-6,8	69,8	12,5	5,8	6,3
	РТК	2020-2049	-1,2	2,4	10,8	11,3	-2,9	21,6	37,8	-24	97,9	1,9	-9,5	17,7
	8,5	2050-2079	19,8	-8,8	-10,0	20,3	-1,0	38,0	49,9	-20	36,4	11,7	19,1	19,8
<i>Gilave</i>	РТК	2020-2049	15,2	5,9	1,6	3,7	8,7	-13,3	50,1	92,7	93,9	-4,2	19,9	-8,0
	2,6	2050-2079	7,2	18,4	10,1	9,8	16,1	5,1	-0,4	37,3	114,2	9,0	26,8	13,2
	РТК	2020-2049	7,3	12,5	9,7	-16,6	17,1	-1,2	19,1	16,0	106,9	6,9	-1,7	27,7
	8,5	2050-2079	30,1	10,8	-6,5	-13,6	19,5	2,0	18,9	29,5	44,2	8,4	19,0	32,3
	РТК	2020-2049	9,7	20,7	-0,2	44,2	6,6	-3,4	73,4	20,0	45,6	0,7	-3,3	0,3
		2050-2079	0,4	3,1	14,8	30,0	-1,7	34,9	-15,3	-5,0	65,7	12,4	10,0	7,0
<i>Mahneshan</i>	РТК	2020-2049	-1,2	2,1	12,1	15,5	-2,4	18,8	34,2	-26	85,3	2,7	-7,5	18,7
	8,5	2050-2079	16,8	-9,1	-9,0	26,1	-0,7	31,7	44,0	-14,8	31,4	11,0	20,0	21,7
	РТК	2020-2049	6,6	3,1	4,3	11,5	1,2	1,8	55,2	72,7	56,9	-6,6	34,2	2,7
		2050-2079	4,8	12,8	5,8	13,5	10,0	42,1	-2,0	44	49,4	6,7	36,2	-7,9
<i>Chari Chai</i>	РТК	2020-2049	6,4	12,9	7,3	-7,2	12,8	16,1	14,2	8,1	54,9	5,6	4,7	-1,1
	8,5	2050-2079	8,2	5,0	-0,6	-6,4	13,1	30,8	54,7	50	23,9	7,3	16,9	6,8
	РТК	2020-2049	12,4	3,2	3,1	10,8	3,7	-3,5	50,3	68	56,1	-4,5	27,4	-4,0
		2050-2079	9,3	15,5	7,6	12,3	-0,4	21,1	20,2	47	44,3	8,2	31,6	8,6
<i>Granko (Myane)</i>	РТК	2020-2049	18,7	18,9	0,5	-21,7	-9,2	-16,5	3,0	199	146,7	11,2	2,3	17,4
	8,5	2050-2079	19,1	9,0	-1,7	-11,6	2,2	10,1	32,9	57	25,4	8,8	14,9	26,8
	РТК	2020-2049	7,2	3,1	-0,3	30,3	23,3	27,1	61,5	9,8	0,0	-1,4	13,5	-0,5
		2050-2079	2,4	-0,5	-6,1	22,8	8,5	76,1	-28	-14	0,0	11,2	10,4	18,0
<i>Hashtad Joft</i>	РТК	2020-2049	4,1	-0,3	4,6	7,6	4,2	1,8	-19	82	0,0	14,3	10,6	33,5
	8,5	2050-2079	-0,1	-9,2	-6,0	13,6	8,3	72,3	38	-30	0,0	7,2	21,1	41,8

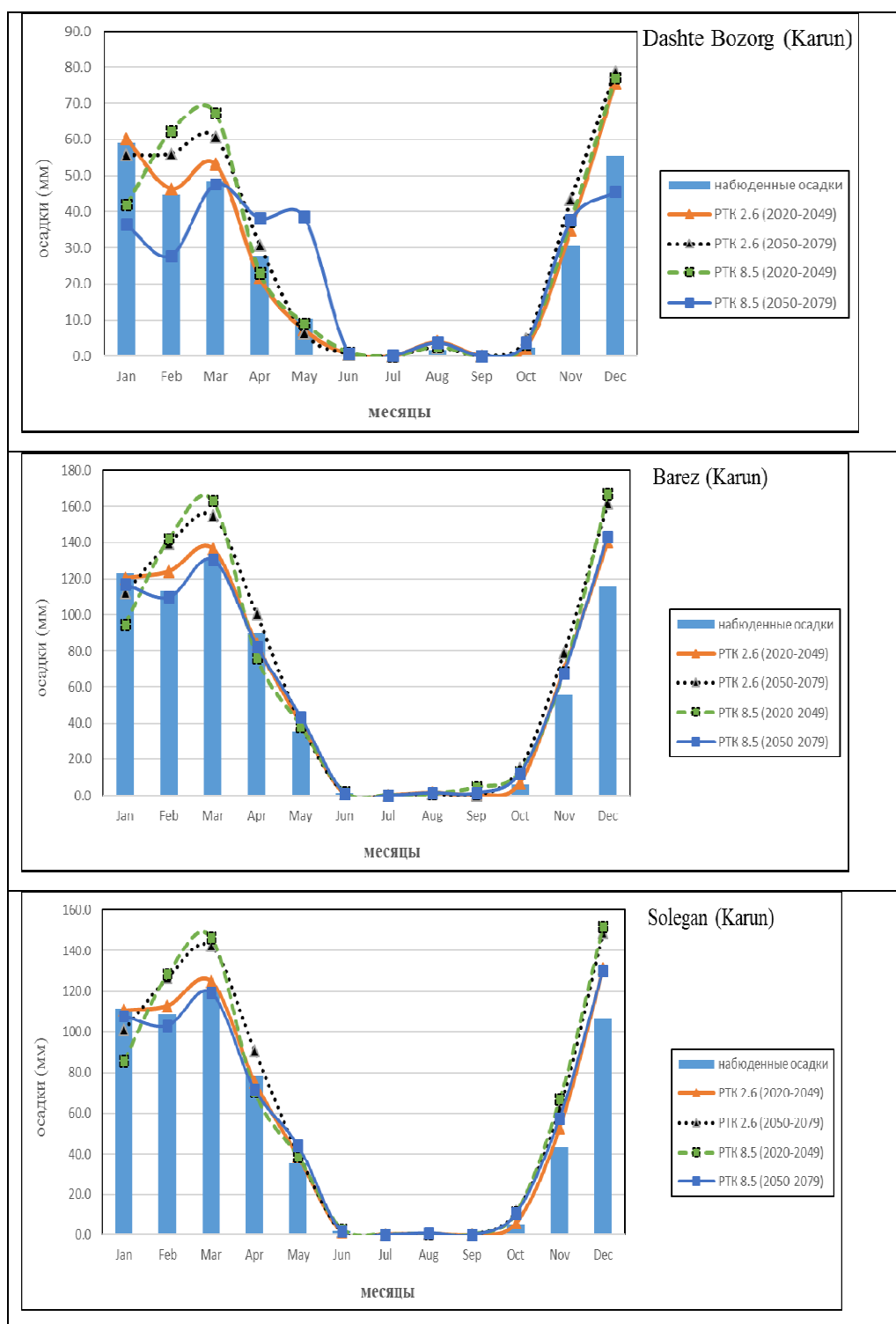


Рисунок Б.1– Изменения осадков для будущего климата для 3 постов бассейна р. Карун (*Dashte Bozorg*, *Barez* и *Solegan*).

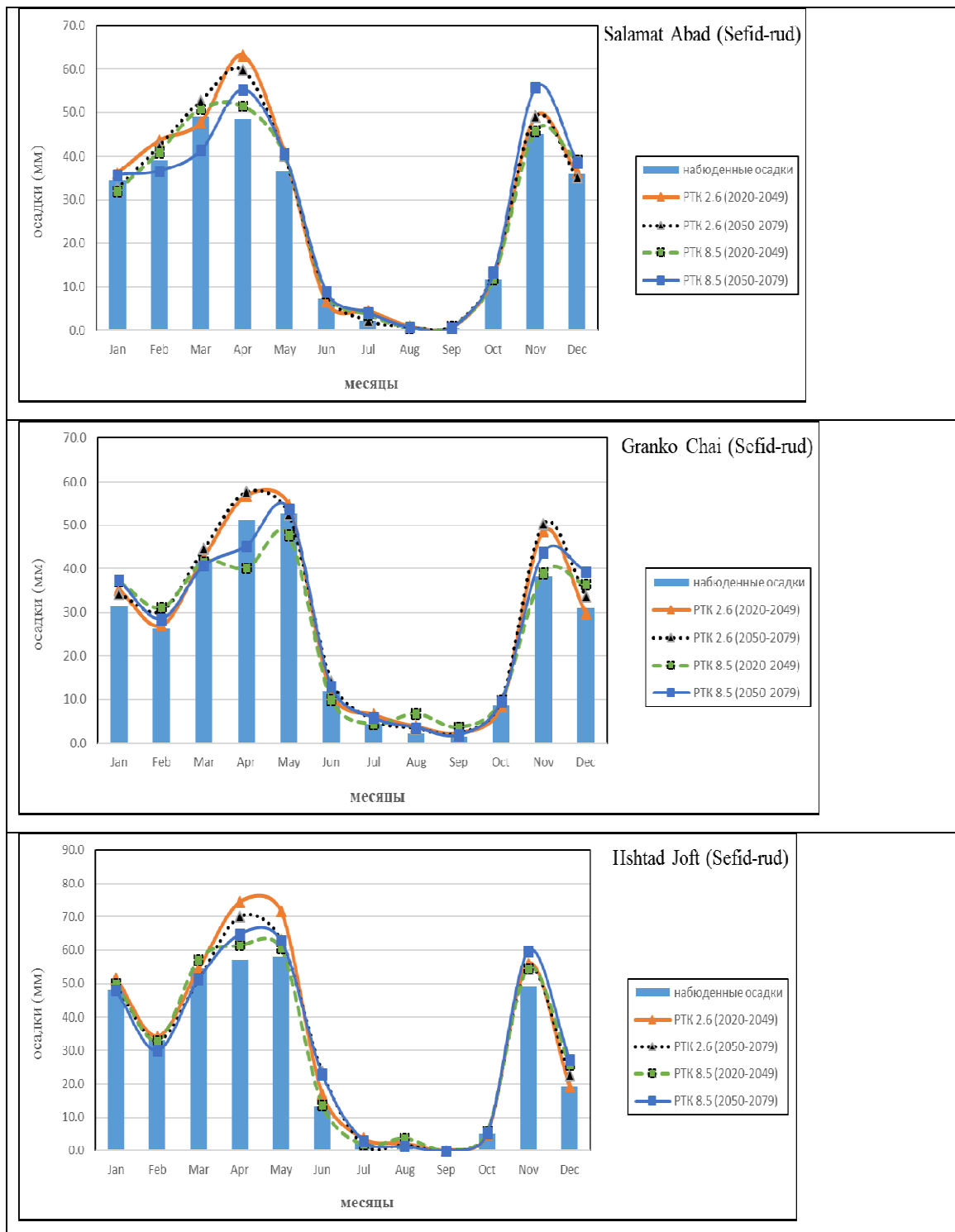


Рисунок Б.2– Изменения осадков для будущего климата для 3 постов бассейна р. Сефидруд (*Salamat Abad*, *GrankoChai* и *Hashtad Joft*)

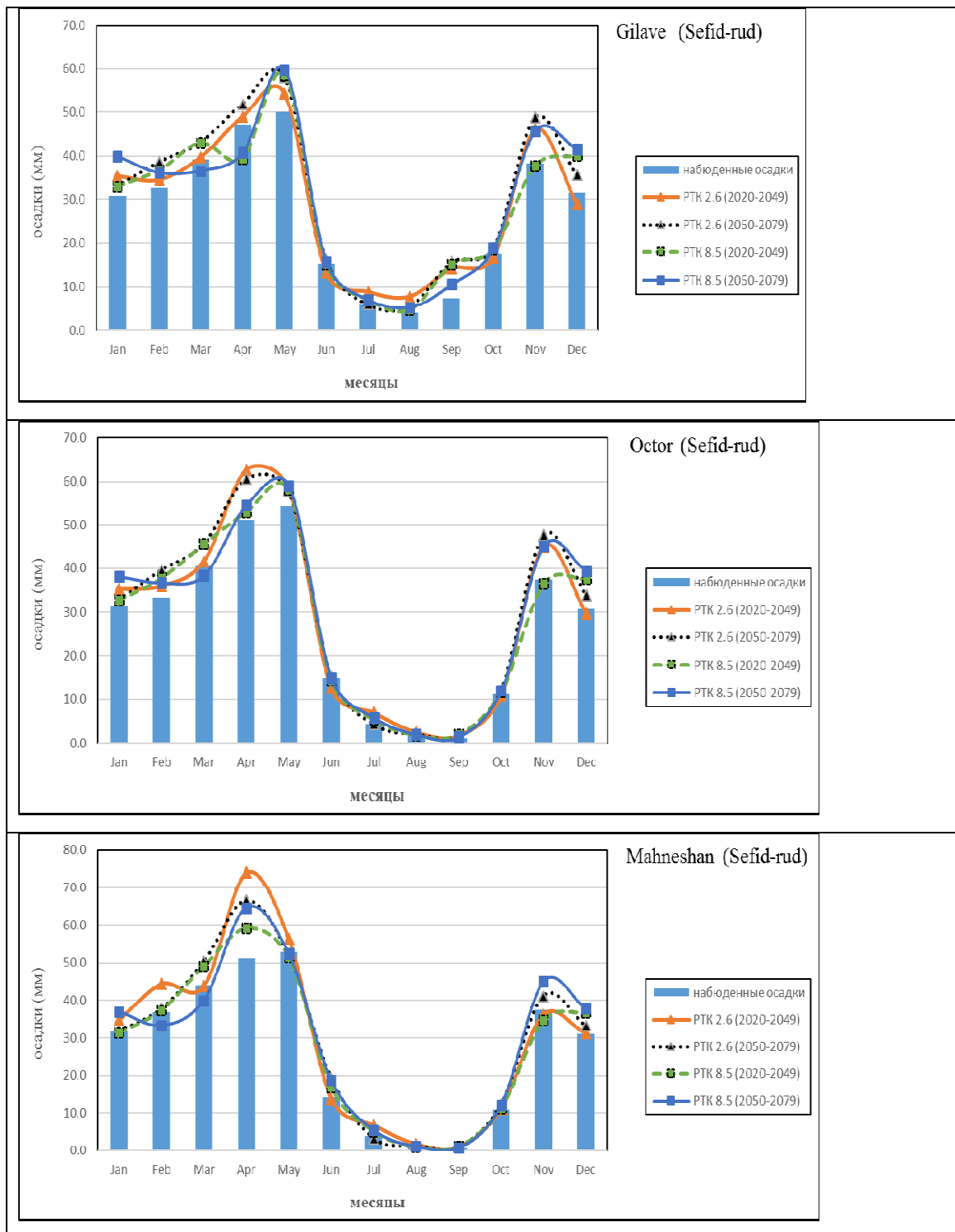


Рисунок Б.3– Изменения осадков для будущего климата для 3 постов бассейна р. Сефидруд (*Gilave*, *Octor* и *Mahneshan*).

Таблица Б.4 – Колебания температуры будущего климата относительно настоящего времени для бассейна р. Карун (С°)

Пункт	РТК	Период	Зима			Весна			Лето			Осень		
			Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
<i>Dorud-Tire</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,1	1,0	0,9	0,8	1,3	1,8	2,1	2,6	1,8	1,6	1,4	1,5
		с 2050 по 2079	1,5	1,6	0,9	0,9	1,3	2,0	2,2	2,5	2,3	1,7	1,5	1,7
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,8	1,6	1,1	1,4	1,7	2,0	2,5	2,5	2,3	2,0	1,6	1,4
		с 2050 по 2079	3,0	3,5	2,8	3,2	3,7	4,3	4,7	5,2	4,6	4,1	3,7	3,3
<i>Behesht Abad</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,1	0,8	0,9	0,6	1,2	1,7	2,0	1,8	2,4	1,6	1,5	1,6
		с 2050 по 2079	1,1	1,4	1,1	0,8	1,2	1,9	2,2	2,1	2,9	1,7	1,6	1,8
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,7	1,4	1,0	1,1	1,7	1,9	2,4	2,1	3,2	2,1	1,7	1,6
		с 2050 по 2079	3,1	3,2	2,5	3,0	3,5	4,1	4,5	4,3	5,6	4,1	3,9	3,4
<i>Rahim Abad</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,5	1,5	1,6	0,9	1,0	1,0	0,8	1,3	1,7	2,1	2,1	1,7
		с 2050 по 2079	1,6	1,6	1,8	1,0	1,6	1,0	0,9	1,4	2,0	2,2	2,2	2,2
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,9	1,8	1,6	1,6	1,6	1,1	1,4	1,8	2,0	2,5	2,3	2,4
		с 2050 по 2079	4,1	3,7	3,3	2,8	3,6	2,7	3,2	3,9	4,4	4,7	4,6	4,9
<i>Armand</i>	РТК2,6	с 2020 по 2049	1,4	1,6	1,7	1,2	1,0	0,9	0,7	1,2	1,7	2,0	2,0	2,0
		с 2050 по 2079	1,9	1,7	1,8	1,7	1,5	0,9	0,8	1,2	1,9	2,2	2,1	2,4
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,8	2,0	1,8	1,6	1,5	1,1	1,2	1,7	1,9	2,4	2,2	2,5
		с 2050 по 2079	4,0	3,8	3,3	3,2	3,4	2,7	3,1	3,6	4,1	4,5	4,5	4,8
<i>Dashte Bozorg</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,5	1,6	1,7	1,2	1,0	0,8	0,8	1,2	1,7	1,9	2,0	1,8
		с 2050 по 2079	1,7	1,7	1,8	1,4	1,5	0,8	0,8	1,3	1,9	2,1	2,1	2,2

Продолжение таблицы Б.4

	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,9	1,9	1,7	1,7	1,6	1,1	1,3	1,8	1,9	2,4	2,2	2,4
		с 2050 по 2079	4,1	3,9	3,4	3,1	3,6	2,7	3,2	3,7	4,1	4,5	4,6	4,8
<i>Pole Krakhbast</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,4	1,4	1,5	1,2	1,0	0,8	0,8	1,3	1,8	2,1	2,0	2,1
		с 2050 по 2079	1,8	1,5	1,7	1,8	1,5	0,9	0,9	1,3	2,0	2,3	2,2	2,6
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,8	1,7	1,4	1,4	1,5	1,1	1,3	1,8	2,0	2,5	2,2	2,7
		с 2050 по 2079	3,9	3,9	3,3	3,1	3,4	2,7	3,2	3,7	4,2	4,6	4,6	5,0
<i>Solegan</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,5	1,6	1,7	1,2	1,0	0,8	0,9	1,3	1,8	2,1	2,0	2,1
		с 2050 по 2079	1,9	1,7	1,8	1,5	1,5	0,8	0,9	1,3	2,0	2,2	2,1	2,5
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,9	2,0	1,8	1,5	1,6	1,1	1,4	1,8	2,0	2,4	2,2	2,7
		с 2050 по 2079	4,0	3,9	3,5	3,1	3,4	2,8	3,2	3,7	4,2	4,6	4,5	5,0
<i>Tange Panj</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,4	1,6	1,7	1,1	1,0	0,9	0,8	1,2	1,7	2,0	2,1	1,8
		с 2050 по 2079	1,6	1,7	1,8	1,3	1,5	0,8	0,8	1,3	1,9	2,1	2,1	2,3
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,8	1,9	1,7	1,7	1,6	1,2	1,3	1,7	1,9	2,4	2,3	2,4
		с 2050 по 2079	4,1	3,8	3,4	3,0	3,6	2,7	3,2	3,7	4,1	4,5	4,7	4,9
<i>Patave</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,4	1,1	0,9	1,1	1,4	1,8	1,9	1,9	1,9	1,5	1,4	1,5
		с 2050 по 2079	1,6	1,6	0,9	1,0	1,4	1,9	2,2	2,0	2,4	1,9	1,5	1,7
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,7	1,6	1,2	1,5	1,9	1,9	2,2	2,1	2,5	2,0	1,7	1,4
		с 2050 по 2079	3,3	3,5	2,8	3,4	3,9	4,1	4,3	4,3	4,9	4,1	3,9	3,5

Таблица Б.5 – Колебания температуры будущего климата относительно настоящего времени для бассейна р. Сефидруд (С°)

Пункт	РТК	Период	Зима			Весна			Лето			Осень		
			Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
<i>Myane-Share chi</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,1	1,1	1,1	0,7	1,2	1,5	1,9	2,3	1,5	1,1	1,7	1,4
		с 2050 по 2079	1,8	1,6	1,0	0,7	1,4	1,9	2,2	2,1	2,0	1,2	1,6	1,9
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	2,0	1,7	1,2	1,2	1,6	1,9	2,4	2,6	2,0	1,3	2,1	1,7
		с 2050 по 2079	2,9	3,5	2,7	2,9	3,3	4,0	4,6	5,3	4,2	3,5	3,5	3,3
<i>Gilave</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,1	1,2	1,1	0,9	1,3	1,5	2,0	2,3	1,5	1,2	1,4	1,3
		с 2050 по 2079	1,4	1,4	1,2	0,9	1,5	1,9	2,3	2,3	2,0	1,3	1,4	1,8
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,7	1,6	1,2	1,3	1,6	2,0	2,5	2,6	2,0	1,5	1,7	1,7
		с 2050 по 2079	2,8	3,3	2,8	3,0	3,3	4,0	4,6	5,2	4,1	3,4	3,3	3,3
<i>Octor</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,0	1,1	1,1	0,6	1,2	1,4	1,8	2,2	1,4	1,1	1,7	1,3
		с 2050 по 2079	1,5	1,6	1,1	0,9	1,4	1,9	2,0	2,1	1,7	1,1	1,5	2,0
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,8	1,7	1,3	1,4	1,5	1,8	2,3	2,5	1,7	1,2	2,1	1,8
		с 2050 по 2079	2,9	3,5	2,9	2,9	3,1	4,0	4,6	5,0	3,8	3,3	3,4	3,3

Продолжение таблицы Б.5

<i>Nesare Oliya</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,2	1,0	1,0	0,7	1,3	1,7	2,2	2,4	1,6	1,6	1,3	1,4
		с 2050 по 2079	2,1	1,7	0,9	0,9	1,4	2,2	2,2	2,3	2,4	1,6	1,4	1,7
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,8	1,8	1,2	1,5	1,7	2,1	2,8	2,7	2,3	1,9	1,5	1,4
		с 2050 по 2079	3,5	3,6	2,8	3,2	3,7	4,6	5,4	5,3	4,7	3,8	3,4	3,2
<i>Myane Gharnggho</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,0	1,1	1,1	0,6	1,2	1,4	1,8	2,2	1,4	1,1	1,7	1,3
		с 2050 по 2079	1,5	1,6	1,1	0,9	1,4	1,9	2,0	2,1	1,7	1,1	1,5	2,0
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,8	1,7	1,3	1,4	1,5	1,8	2,3	2,5	1,7	1,2	2,1	1,8
		с 2050 по 2079	2,9	3,5	2,9	2,9	3,1	4,0	4,6	5,0	3,8	3,3	3,4	3,3
<i>Salamat Abad</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,2	1,0	1,0	0,8	1,3	1,7	2,2	2,4	1,7	1,5	1,2	1,2
		с 2050 по 2079	1,8	1,7	0,9	0,9	1,4	2,2	2,2	2,3	2,3	1,6	1,4	1,6
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,9	1,8	1,2	1,6	1,7	2,1	2,8	2,7	2,2	1,8	1,4	1,2
		с 2050 по 2079	3,2	3,6	2,8	3,2	3,8	4,6	5,4	5,3	4,5	3,8	3,3	3,0
<i>Sarcham</i>	РТК 2,6	с 2020 по 2049	1,1	1,0	1,0	1,1	0,9	1,4	2,1	2,4	1,6	1,5	1,2	1,4
		с 2050 по 2079	1,7	2,5	0,8	0,6	1,3	1,8	2,3	2,2	2,3	1,6	1,3	1,9
	РТК 8,5	с 2020 по 2049	1,9	2,3	1,1	1,1	1,1	1,8	2,5	2,7	2,2	1,8	1,5	1,7
		с 2050 по 2079	3,0	4,3	2,8	3,1	2,6	3,7	4,4	5,4	4,4	3,6	3,2	3,3

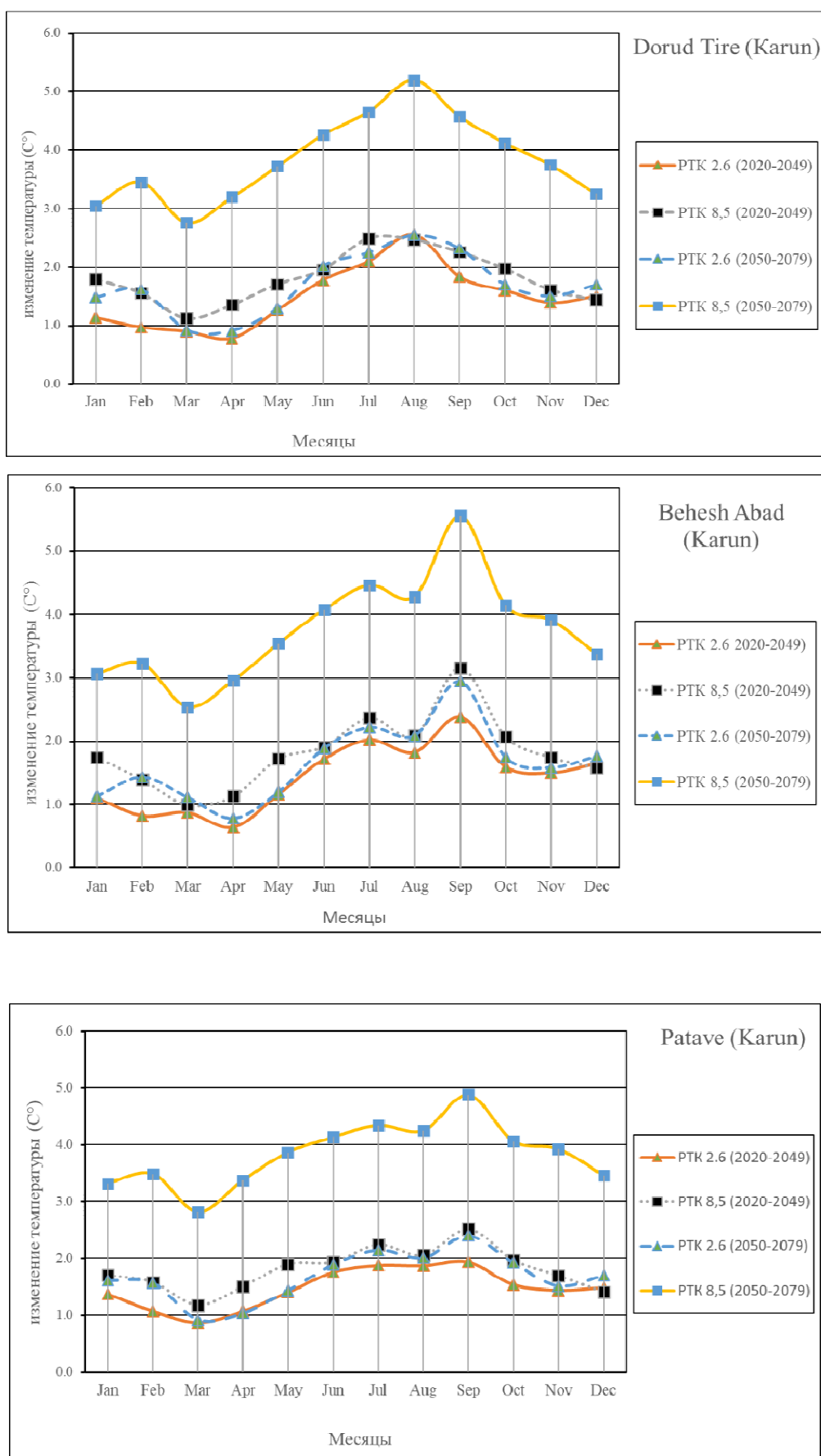


Рисунок Б.4 – Колебания температуры для 3 станций бассейна р. Карун.

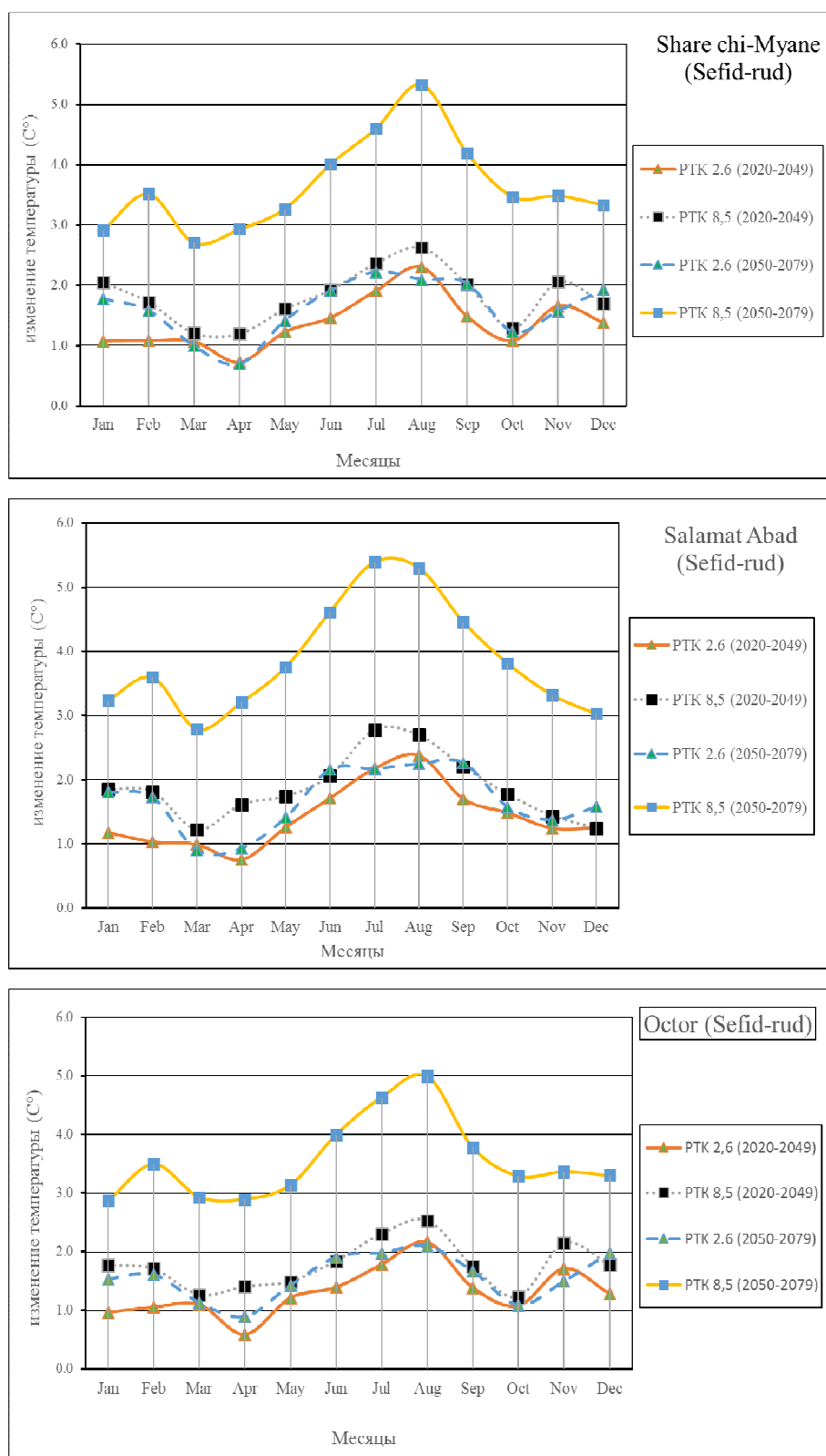


Рисунок Б.5 – Колебания температуры для 3 станций бассейна р. Сefид-руд.

Приложение В – Оценка гидрологического режима рек Ирана при изменении климата

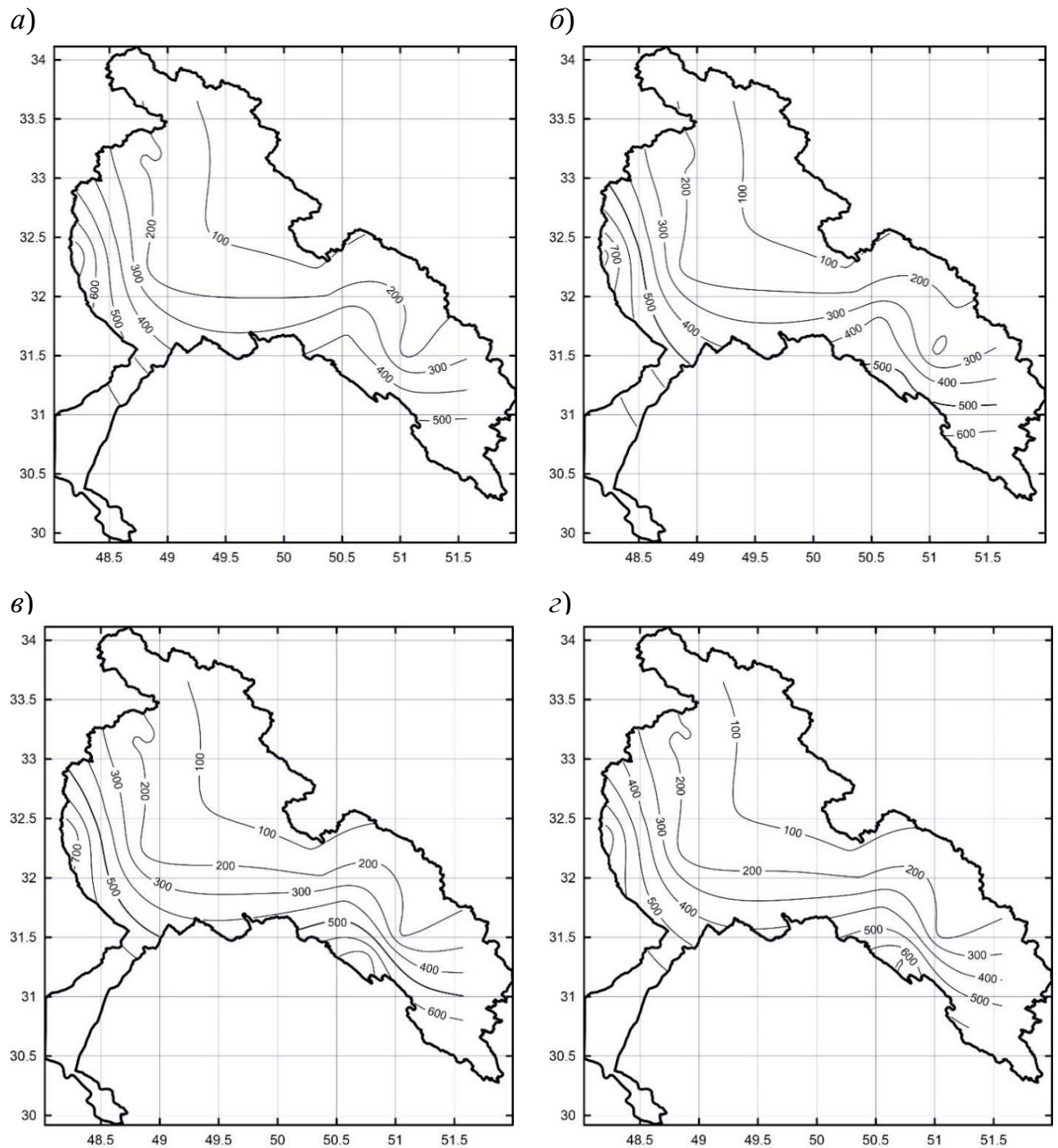


Рисунок В.1 – Карты слоя стока бассейна р. Карун:

- а* – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;
- б* – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;
- в* – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;
- z* – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

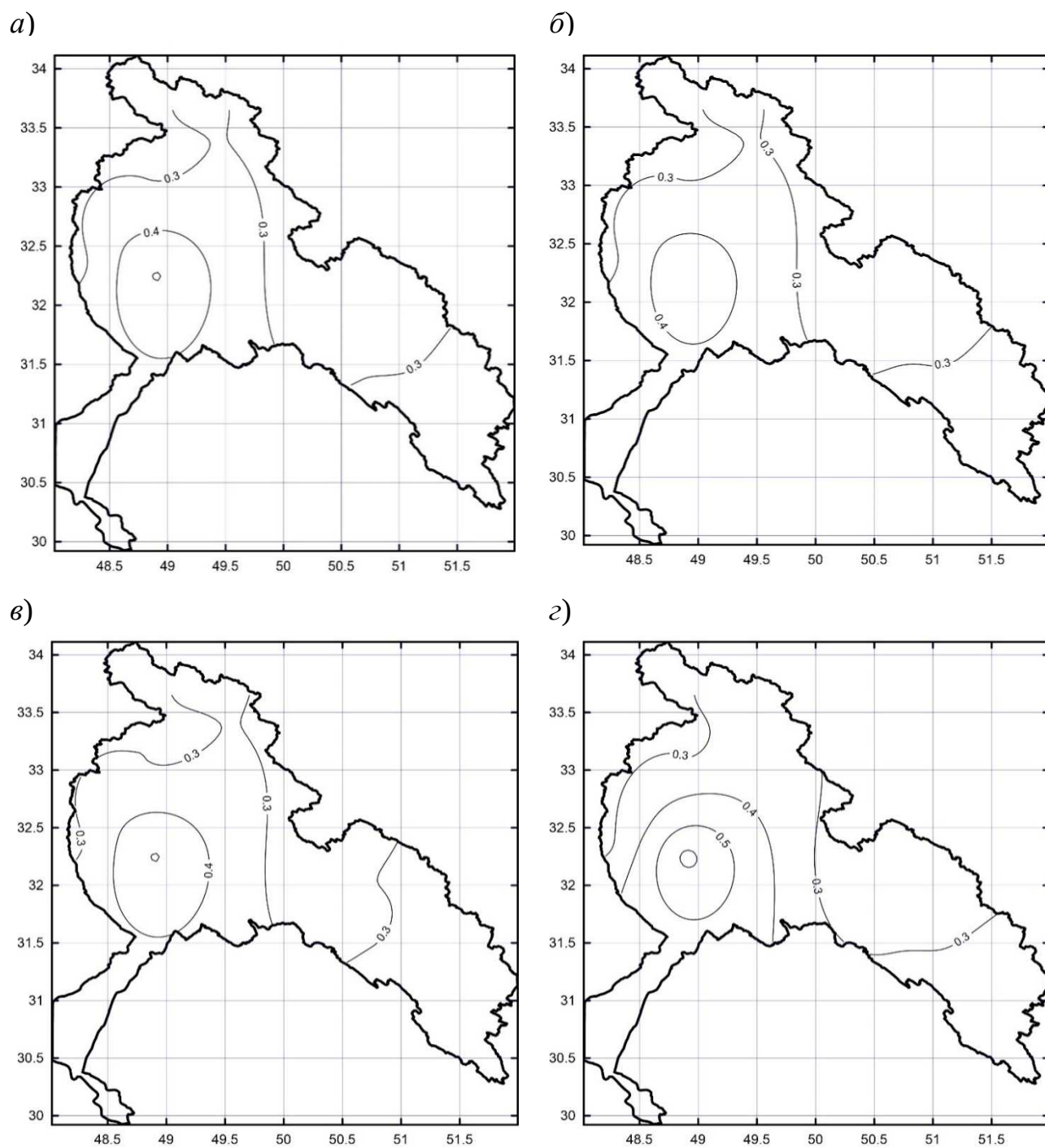


Рисунок В.2 –Карты коэффициента вариации стока бассейна р. Карун:

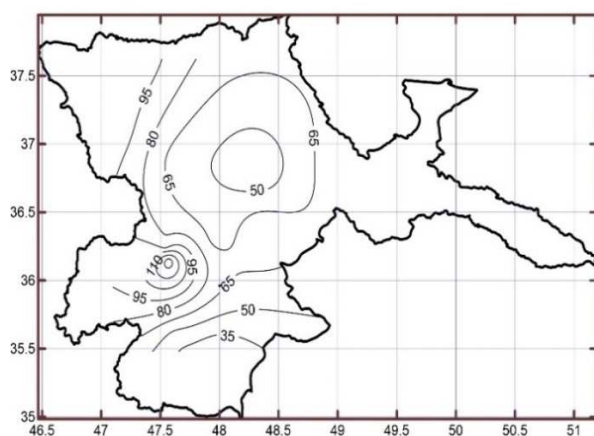
а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;

б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;

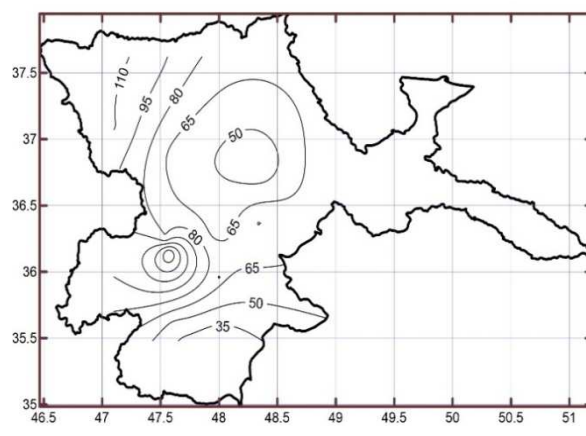
в – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;

г – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

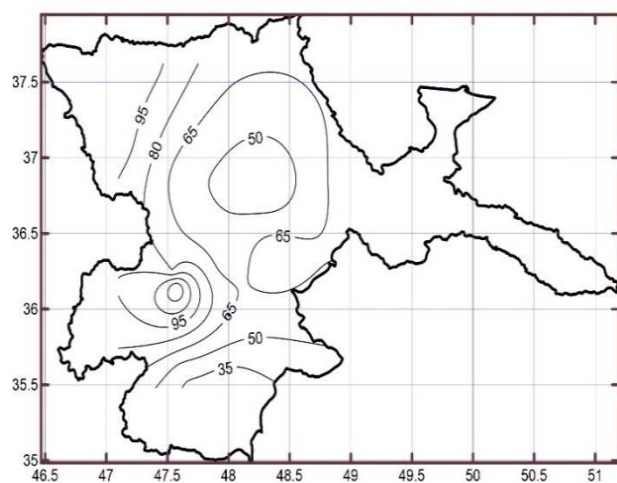
а)



б)



в)



г)

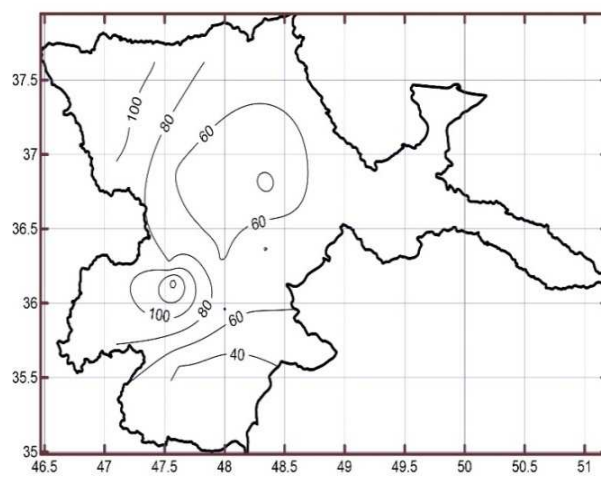


Рисунок В.3 – Карты слоя стока бассейна р. Сефидруд:

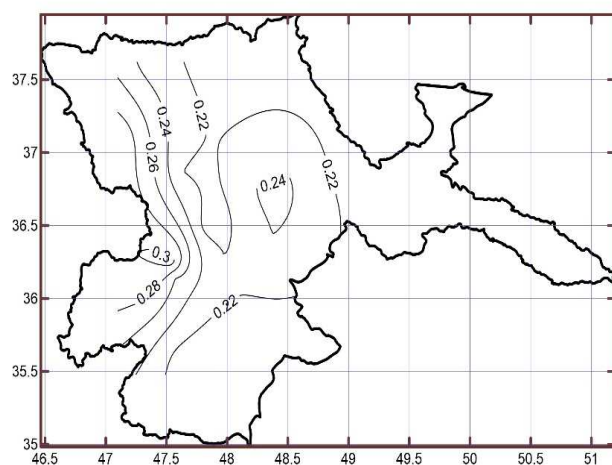
а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;

б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;

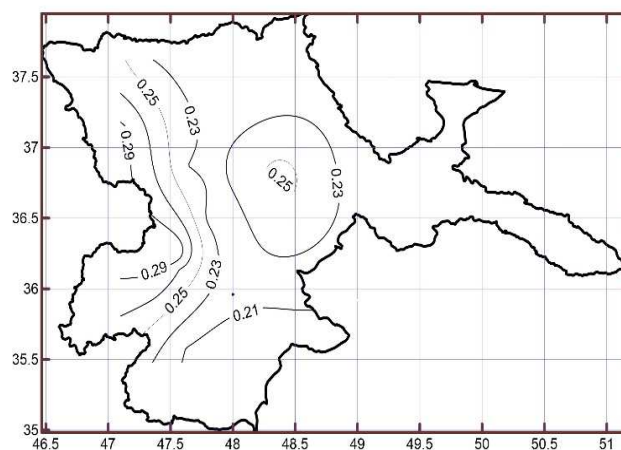
в – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;

г – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

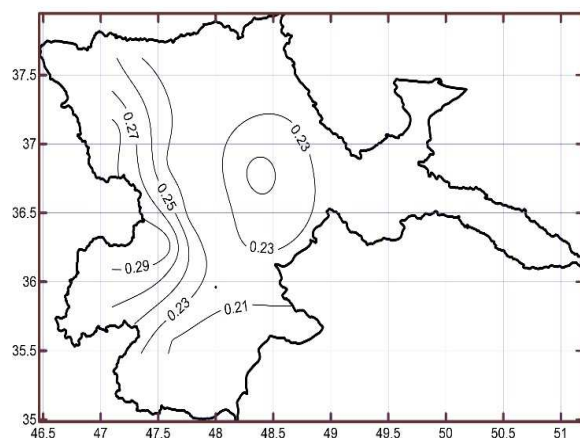
а)



б)



в)



г)

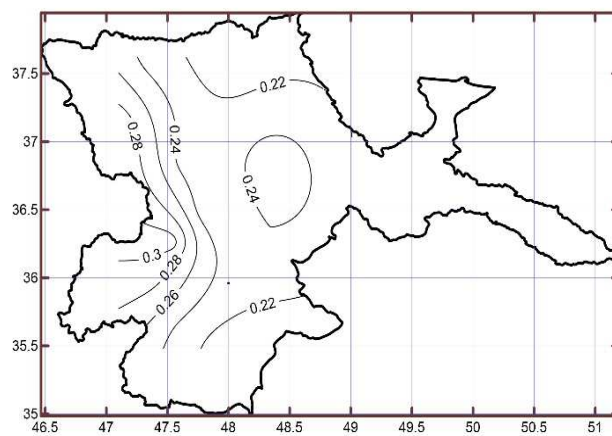


Рисунок В.4 –Карты коэффициента вариации стока бассейна р. Сефидруд:

а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;

б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;

в – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;

г – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

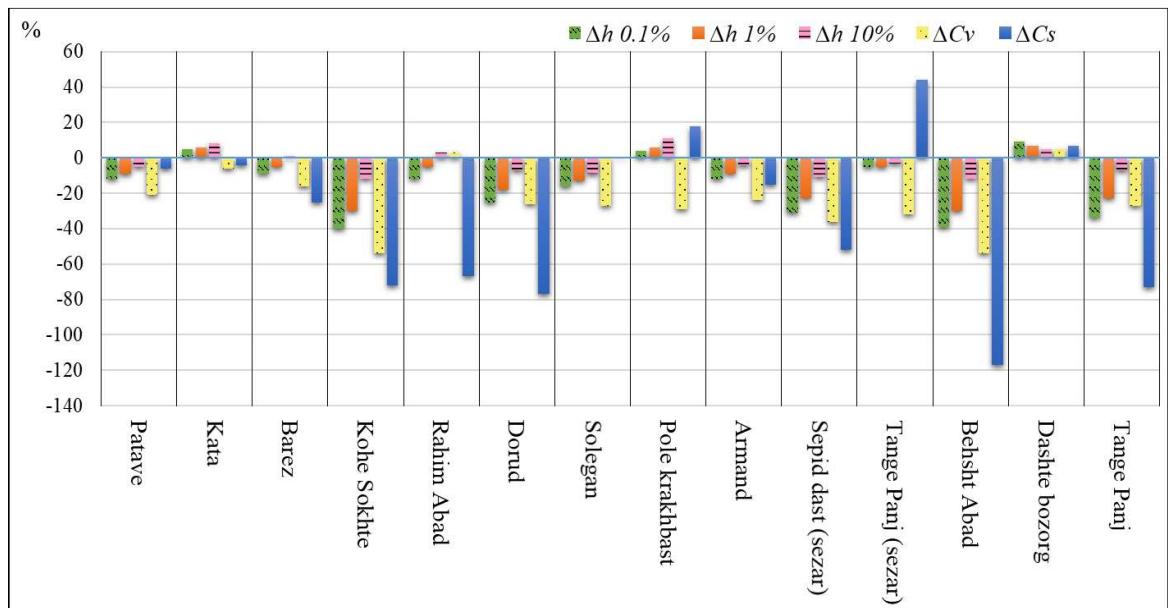
Таблица В.1 – Относительные отклонения сценарных значений статистических величин от фактических для бассейна р. Карун

Пункт	Климатический сценарий	Период	Δh , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %	Пункт	Климатический сценарий	Период	Δh , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %
			0.1	1	10						0.1	1	10		
<i>Patave</i>	РТК 2,6	I	-12	-9	-5	-21	-6	<i>Pole krakhbast</i>	РТК 2,6	I	4	6	11	-29	18
		II	-2	1	5	-20	-7			II	12	16	23	-28	2
	РТК 8,5	I	-5	-2	2	-18	-9		РТК 8,5	I	13	16	22	-21	-9
		II	-14	-11	-7	-20	-9			II	2	4	10	-28	11
<i>Kata</i>	РТК 2,6	I	5	6	8	-6	-4	<i>Armand</i>	РТК 2,6	I	-12	-9	-4	-24	-15
		II	7	12	18	-7	-26			II	-9	-4	5	-24	-37
	РТК 8,5	I	1	7	13	-5	-32		РТК 8,5	I	-12	-6	2	-23	-39
		II	-1	2	6	-6	-18			II	-16	-12	-6	-24	-28
<i>Barez</i>	РТК 2,6	I	-9	-5	1	-16	-25	<i>Sepid dast (sezar)</i>	РТК 2,6	I	-31	-23	-11	-36	-52
		II	6	9	14	-12	-17			II	-27	-19	-6	-36	-52
	РТК 8,5	I	56	59	64	-15	-2		РТК 8,5	I	-30	-23	-10	-37	-52
		II	44	46	50	-15	1,0			II	-27	-22	-12	-32	-43
<i>Kohe Sokhte</i>	РТК 2,6	I	-40	-30	-12	-54	-72	<i>Tange Panj (sezar)</i>	РТК 2,6	I	-5	-5	-3	-32	44
		II	-40	-30	-11	-52	-67			II	-2	-1	3	-33	32
	РТК 8,5	I	-40	-30	-11	-52	-67		РТК 8,5	I	-3	-3	-1	-31	42
		II	-42	-32	-14	-52	-69			II	-11	-10	-6	-32	30
<i>Rahim Abad</i>	РТК 2,6	I	-12	-5	3	3	-67	<i>Behsht Abad</i>	РТК 2,6	I	-39	-30	-12	-54	-117
		II	-6	1	10	3	-64			II	-33	-22	-3	-53	-120
	РТК 8,5	I	-11	-4	4	4	-66		РТК 8,5	I	-38	-29	-13	-53	-109
		II	-11	-6	0	7	-52			II	-39	-30	-13	-52	-116
<i>Dorud</i>	РТК 2,6	I	-25	-18	-7	-26	-77	<i>Dashte bozorg</i>	РТК 2,6	I	9	7	5	5	7
		II	-21	-14	-2	-26	-73			II	15	16	18	1	-15
	РТК 8,5	I	-24	-17	-6	-25	-75		РТК 8,5	I	17	16	15	5	4
		II	-27	-20	-9	-23	-52			II	44	32	13	31	78
<i>Solegan</i>	РТК 2,6	I	-16	-13	-9	-27	6,0	<i>Tange Panj</i>	РТК 2,6	I	-34	-23	-7	-27	-73
		II	-9	-6	1	-27	-12			II	-28	-17	1	-26	-76
	РТК 8,5	I	-4	-1	4	-19	-16		РТК 8,5	I	-30	-20	-3	-26	-76
		II	-17	-14	-9	-26	-3			II	-32	-23	-7	-25	-70

Таблица В.2 – Относительные отклонения сценарных значений статистических величин от фактических для бассейна р. Сефидруд

Пункт	Климатический сценарий	Период	Δh , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %	пункт	Климатический сценарий	Период	Δh , %			ΔC_v , %	ΔC_s , %
			0,1	1	10						0,1	1	10		
<i>Binalud</i>	РТК 2,6	I	-21	-18	-11	-43	28	<i>Moter Khane</i>	РТК 2,6	I	-38	-29	-11	-49	-87
		II	-21	-18	-11	-43	28			II	-35	-26	-8	-49	-87
	РТК 8,5	I	-25	-22	-15	-43	26		РТК 8,5	I	-40	-31	-14	-49	-87
		II	-22	-20	-13	-42	30			II	-38	-30	-13	-49	-87
<i>Hashtad Joft</i>	РТК 2,6	I	-37	-26	-4	-48	-70	<i>Ostor</i>	РТК 2,6	I	-40	-32	-16	-59	-40
		II	-39	-28	-7	-48	-72			II	-38	-30	-13	-59	-41
	РТК 8,5	I	-40	-30	-9	-48	-73		РТК 8,5	I	-46	-36	-18	-59	-48
		II	-39	-28	-7	-48	-70			II	-39	-31	-15	-58	-38
<i>Salamat Abad</i>	РТК 2,6	I	-45	-38	-21	-64	-26	<i>Gilave</i>	РТК 2,6	I	-47	-37	-16	-59	-66
		II	-44	-37	-22	-63	-20			II	-44	-33	-10	-59	-68
	РТК 8,5	I	-46	-40	-25	-63	-20		РТК 8,5	I	-49	-38	-16	-59	-70
		II	-42	-36	-22	-60	-7			II	-45	-35	-13	-59	-65
<i>Gragoni-Ghezelozon</i>	РТК 2,6	I	-28	-24	-14	-59	52	<i>Myane (shahre Chai)</i>	РТК 2,6	I	-38	-30	-16	-54	-49
		II	-27	-23	-14	-57	59			II	-35	-27	-13	-53	-57
	РТК 8,5	I	-31	-27	-18	-58	58		РТК 8,5	I	-39	-32	-18	-53	-66
		II	-26	-23	-14	-56	64			II	-37	-30	-16	-53	-63
<i>IyankiKand</i>	РТК 2,6	I	-23	-12	8	-51	-55	<i>Myane-Granko</i>	РТК 2,6	I	-17	-13	-6	-39	-3
		II	-22	-10	11	-49	-59			II	-14	-10	-2	-38	-5
	РТК 8,5	I	-26	-15	6	-50	-61		РТК 8,5	I	-18	-15	-10	-35	4
		II	-20	-9	11	-49	-57			II	-16	-12	-6	-36	-4
<i>Sarcham</i>	РТК 2,6	I	-41	-34	-18	-62	-35	<i>Mahneshan-Ghezelozon</i>	РТК 2,6	I	67	46	5	-58	13
		II	-43	-34	-16	-62	-48			II	-29	-25	-14	-56	18
	РТК 8,5	I	-44	-36	-19	-62	-46		РТК 8,5	I	-33	-28	-18	-57	16
		II	-41	-33	-17	-61	-38			II	-28	-24	-14	-56	29
<i>PoleDokhtar</i>	РТК 2,6	I	-31	-25	-12	-57	-3	<i>Shadi Abad-Cheshme shor</i>	РТК 2,6	I	-51	-41	-19	-68	-65
		II	-29	-23	-11	-56	4			II	-50	-40	-18	-69	-62
	РТК 8,5	I	-33	-27	-15	-57	-4		РТК 8,5	I	-54	-44	-22	-70	-67
		II	-28	-23	-11	-56	9			II	-52	-43	-22	-66	-53

a)



b)

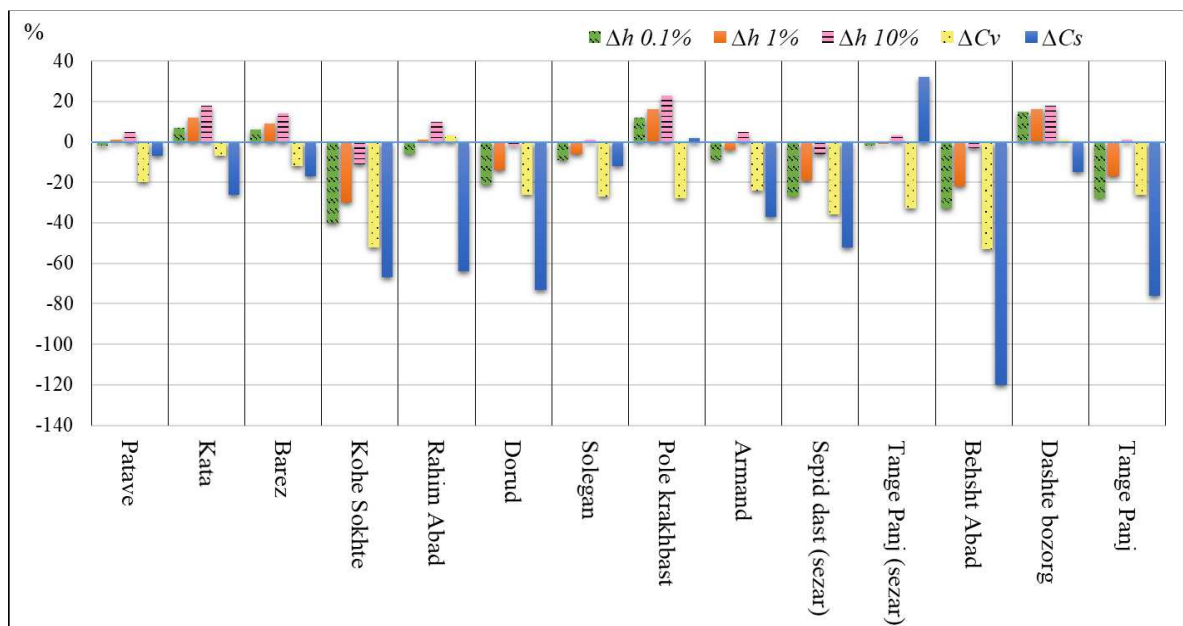
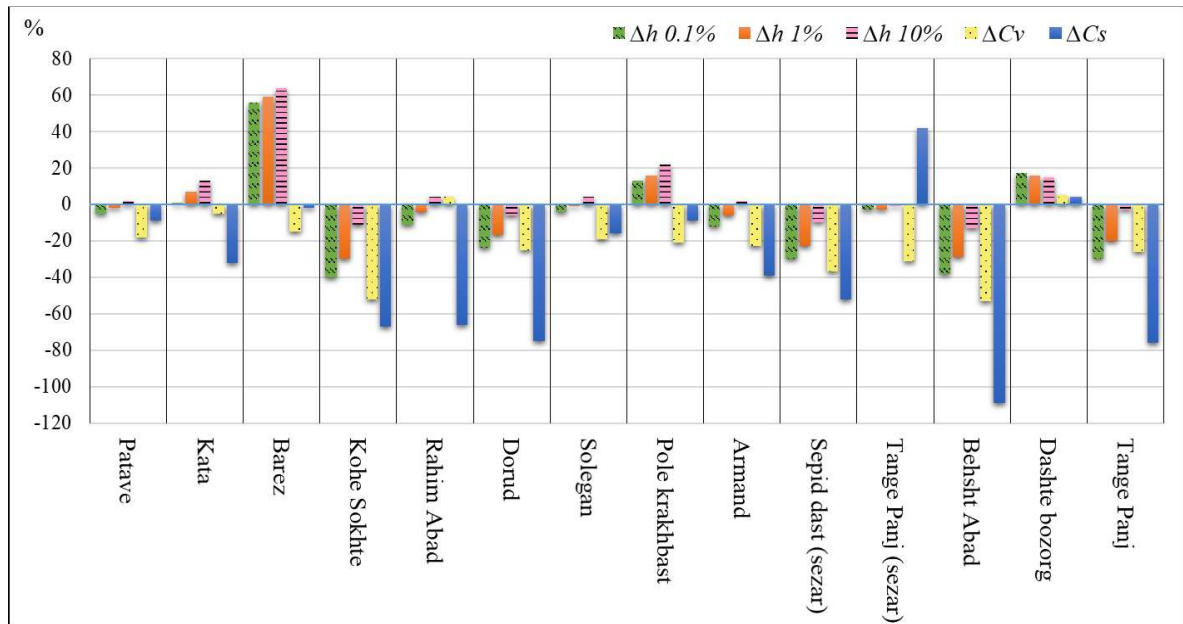


Рисунок В.5 – Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик стока с бассейна р. Карун: *a* – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6; *б* – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6.

a)



b)

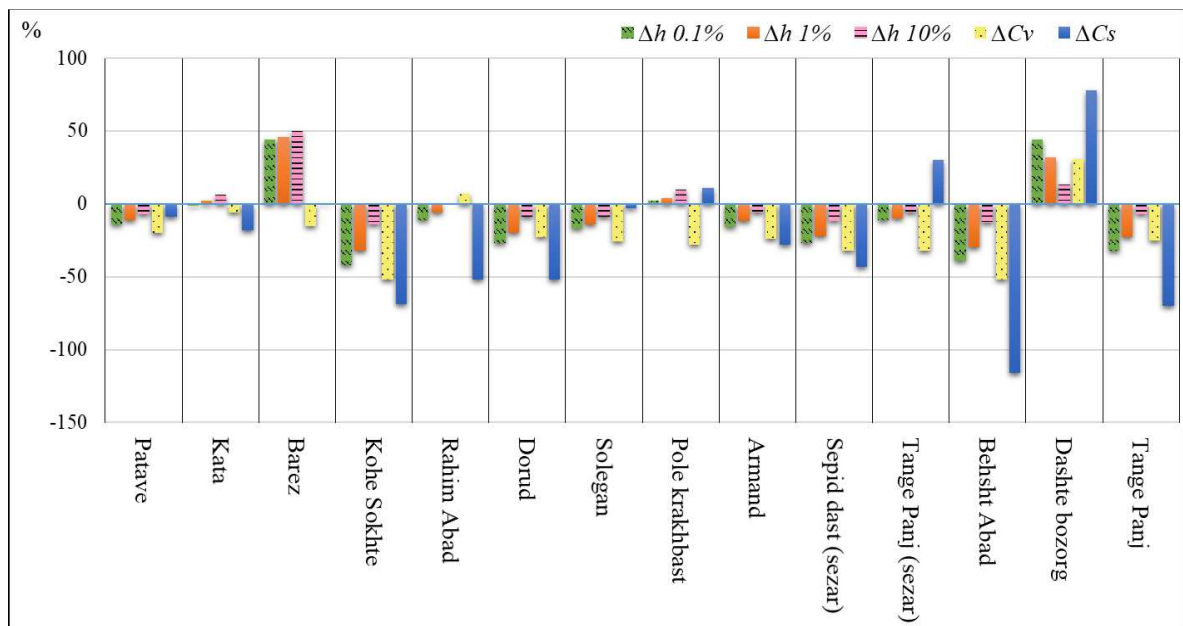
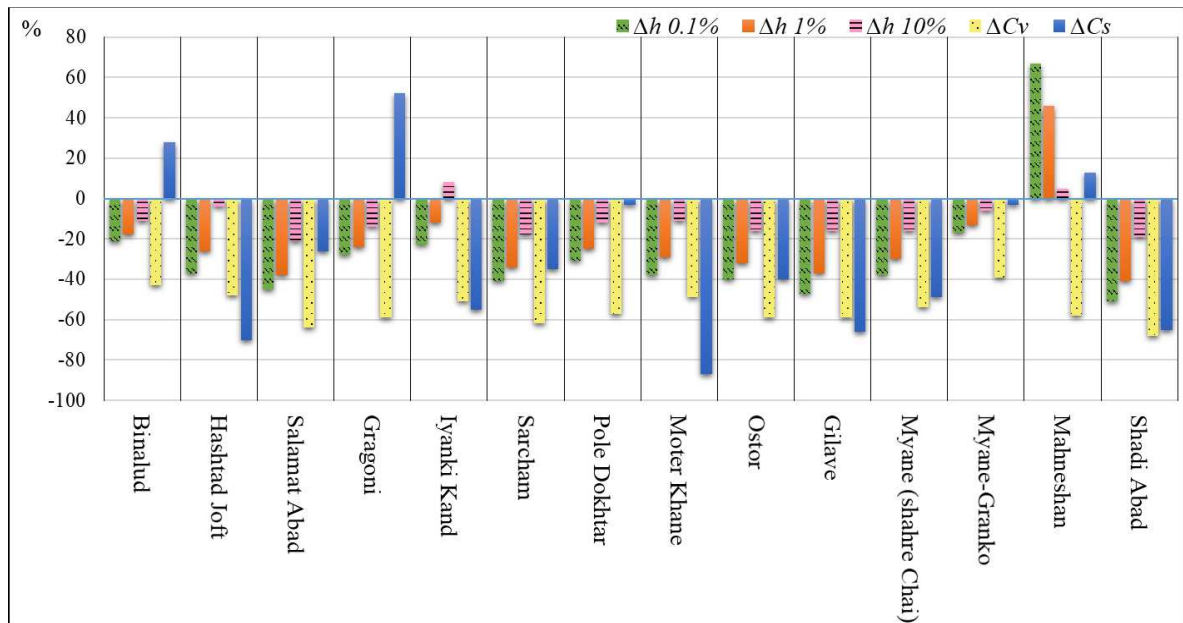


Рисунок В.6— Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик стока с бассейна р. Карун: а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5; б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

а)



б)

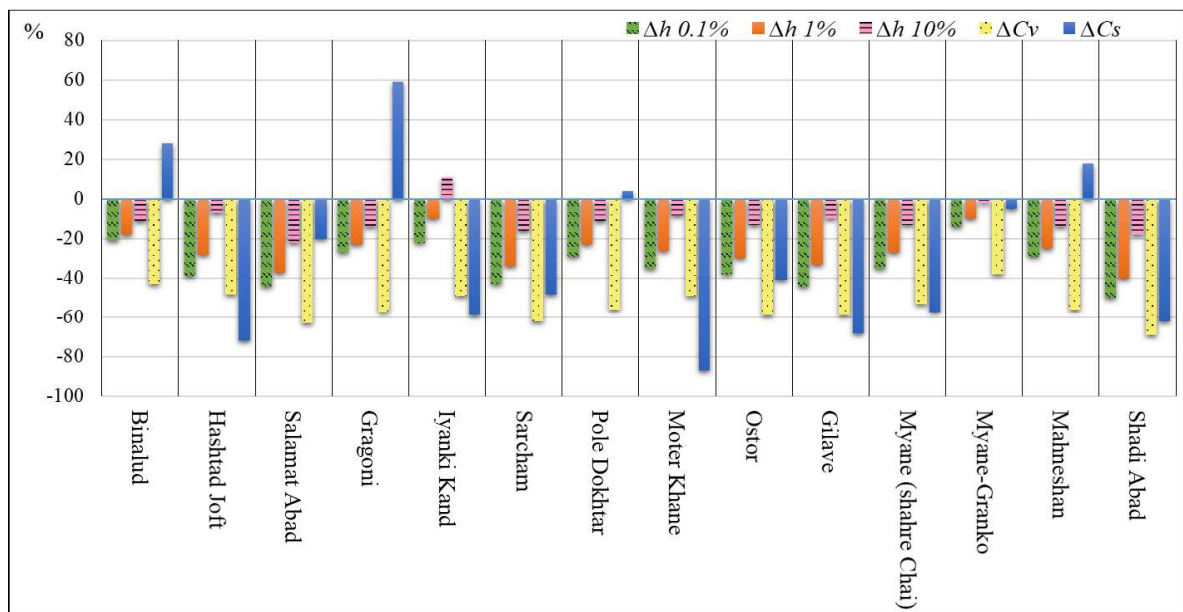
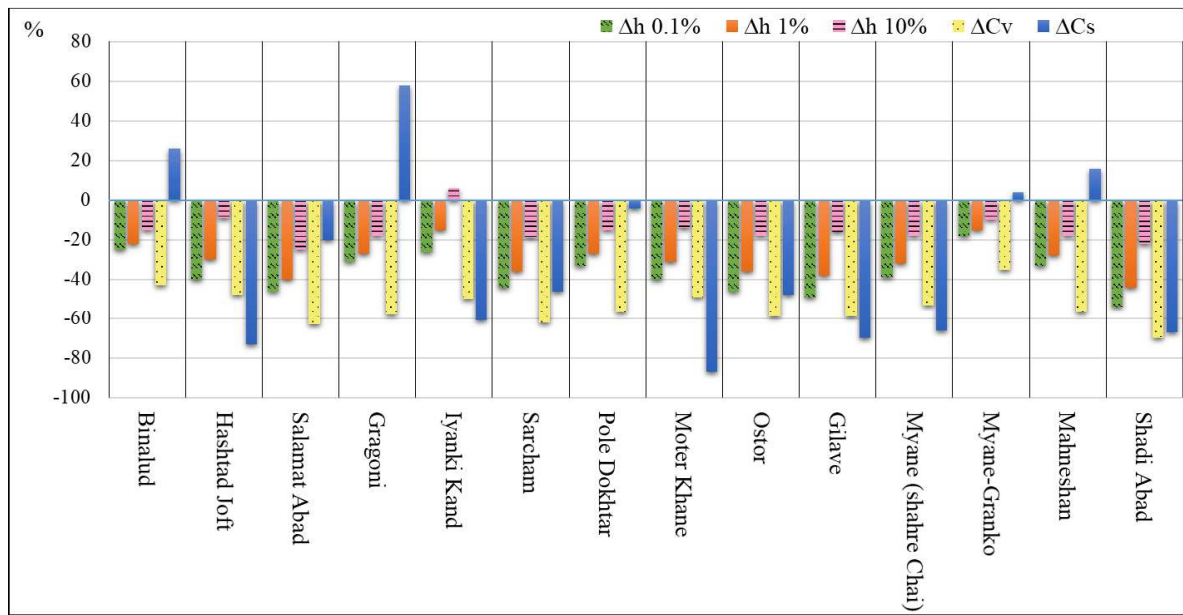


Рисунок В.7 – Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик стока с бассейна р. Сефидруд: а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6; б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6.

a)



b)

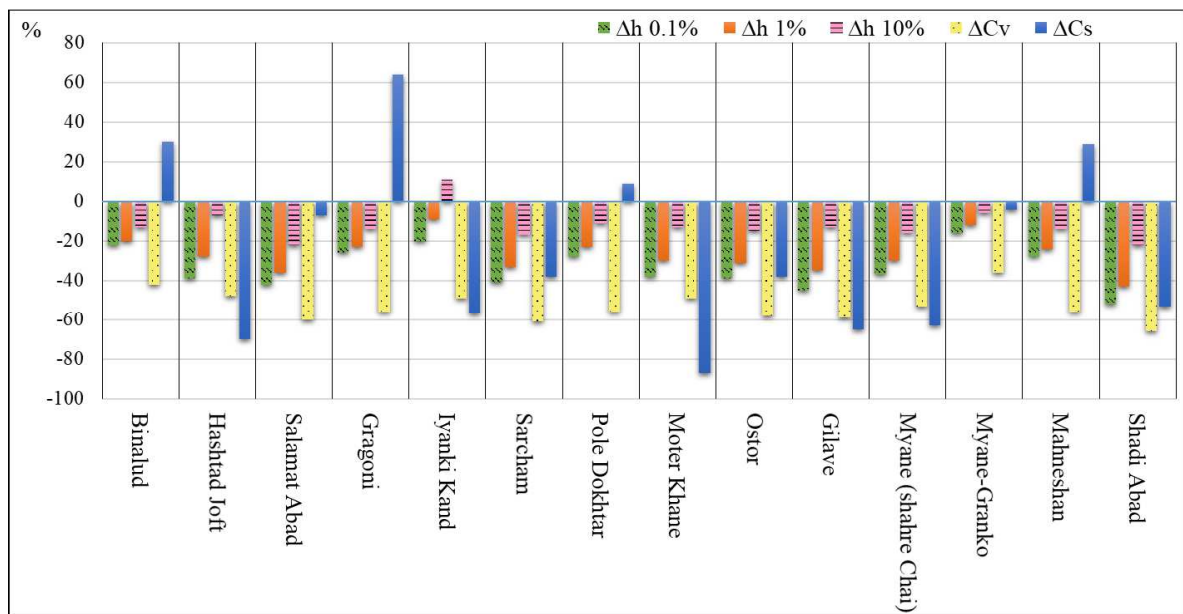


Рисунок В.8 – Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик стока с бассейна р. Сефидруд: *a* – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5; *б* – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

Таблица В.3 – Прогнозные коэффициент автокорреляции и критерий $\beta_{\text{пр}}$ для бассейна р. Карун

Пост	РТК 2,6				РТК 8,5			
	с 2020 по 2049 гг.		с 2050 по 2079 гг.		с 2020 по 2049 гг.		с 2050 по 2079 гг.	
	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$
<i>Rahim Abad</i>	0,64	1,79	0,63	1,78	0,62	1,78	0,62	1,77
<i>Dorud</i>	0,6	1,64	0,58	1,62	0,58	1,62	0,55	1,58
<i>Sepid dast</i>	0,33	1,20	0,29	1,10	0,31	1,15	0,31	1,15
<i>Tange Panj</i>	0,2	0,15	0,2	0,13	0,2	0,14	0,23	0,29
<i>Behsht Abad</i>	0,25	0,85	0,22	0,74	0,2	0,69	0,24	0,82
<i>Dashte bozorg</i>	0,16	0,55	0,18	0,63	0,14	0,44	0,25	0,9

Таблица В.4 –Прогнозные коэффициент автокорреляции и критерий $\beta_{\text{пр}}$ для бассейна р. Сефидруд

Пост	РТК 2,6				РТК 8,5			
	с 2020 по 2049 гг.		с 2050 по 2079 гг.		с 2020 по 2049 гг.		с 2050 по 2079 гг.	
	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$	$r(1)_{\text{пр}}$	$\beta_{\text{пр}}$
<i>Binalud</i>	0,14	0,85	0,15	0,88	0,14	0,85	0,16	0,94
<i>Salamat Abad</i>	0,23	1,64	0,24	1,65	0,24	1,66	0,21	1,63
<i>Hashtad Joft</i>	0,02	0,36	0,03	0,46	0,03	0,53	0,02	0,35
<i>Gragoni-</i>	0,21	1,48	0,22	1,49	0,22	1,49	0,22	1,48
<i>Pole Dokhtar</i>	0,1	1,26	0,12	1,31	0,12	1,31	0,12	1,33
<i>Moter Khane</i>	0,23	0,97	0,23	0,97	0,23	0,97	0,23	0,97
<i>Ostor</i>	0,06	0,83	0,08	0,95	0,07	0,93	0,08	0,97
<i>Gilave</i>	0,08	0,93	0,1	0,99	0,11	1,04	0,11	1,07
<i>Mahneshan-</i>	0,12	1,28	0,13	1,33	0,13	1,32	0,14	1,33
<i>Shadi Abad-</i>	0,29	1,86	0,33	1,87	0,34	1,87	0,29	1,85

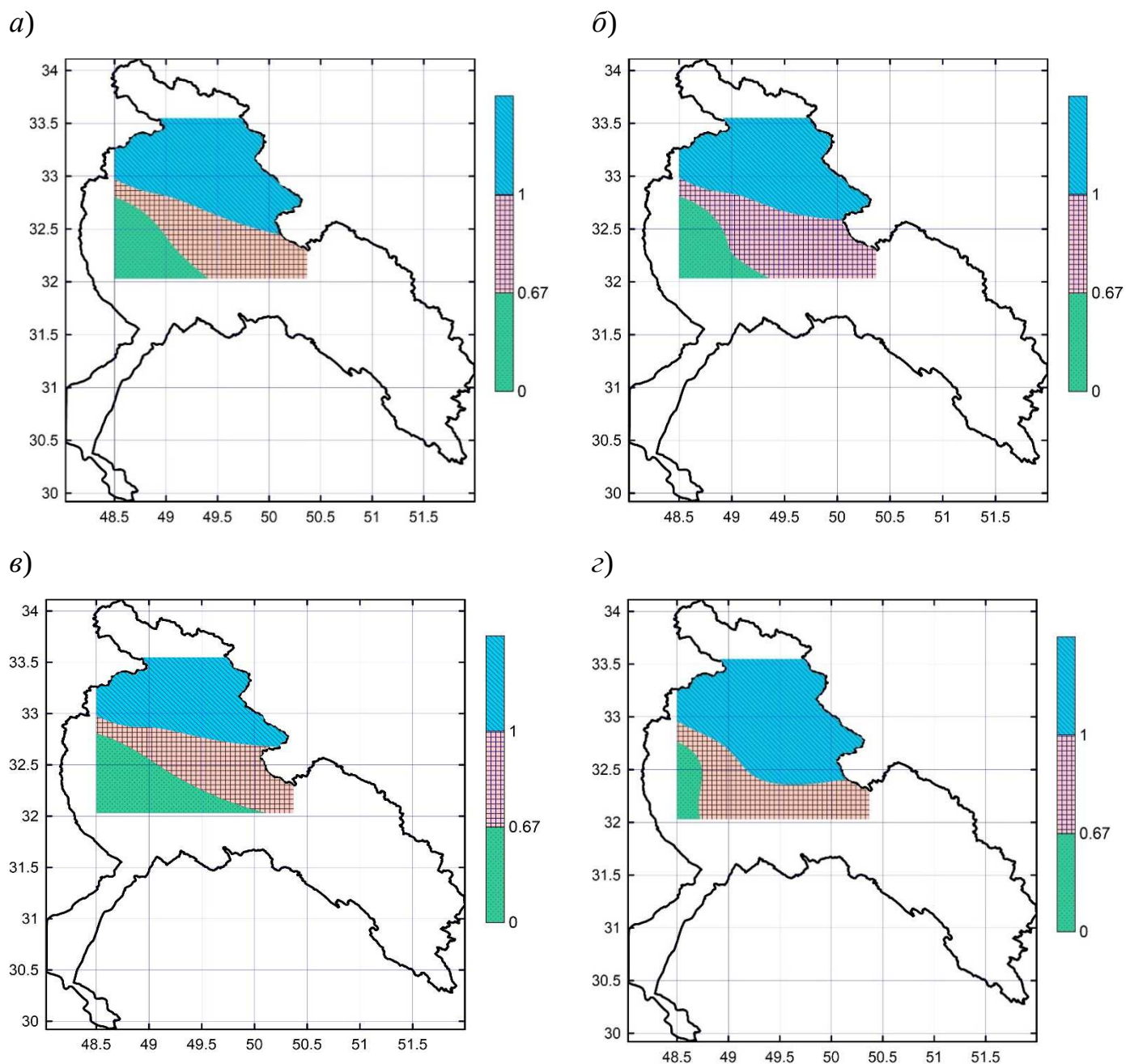


Рисунок В.9 – Распределение критерия β в бассейне р. Карун:

а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;

б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;

в – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;

з – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

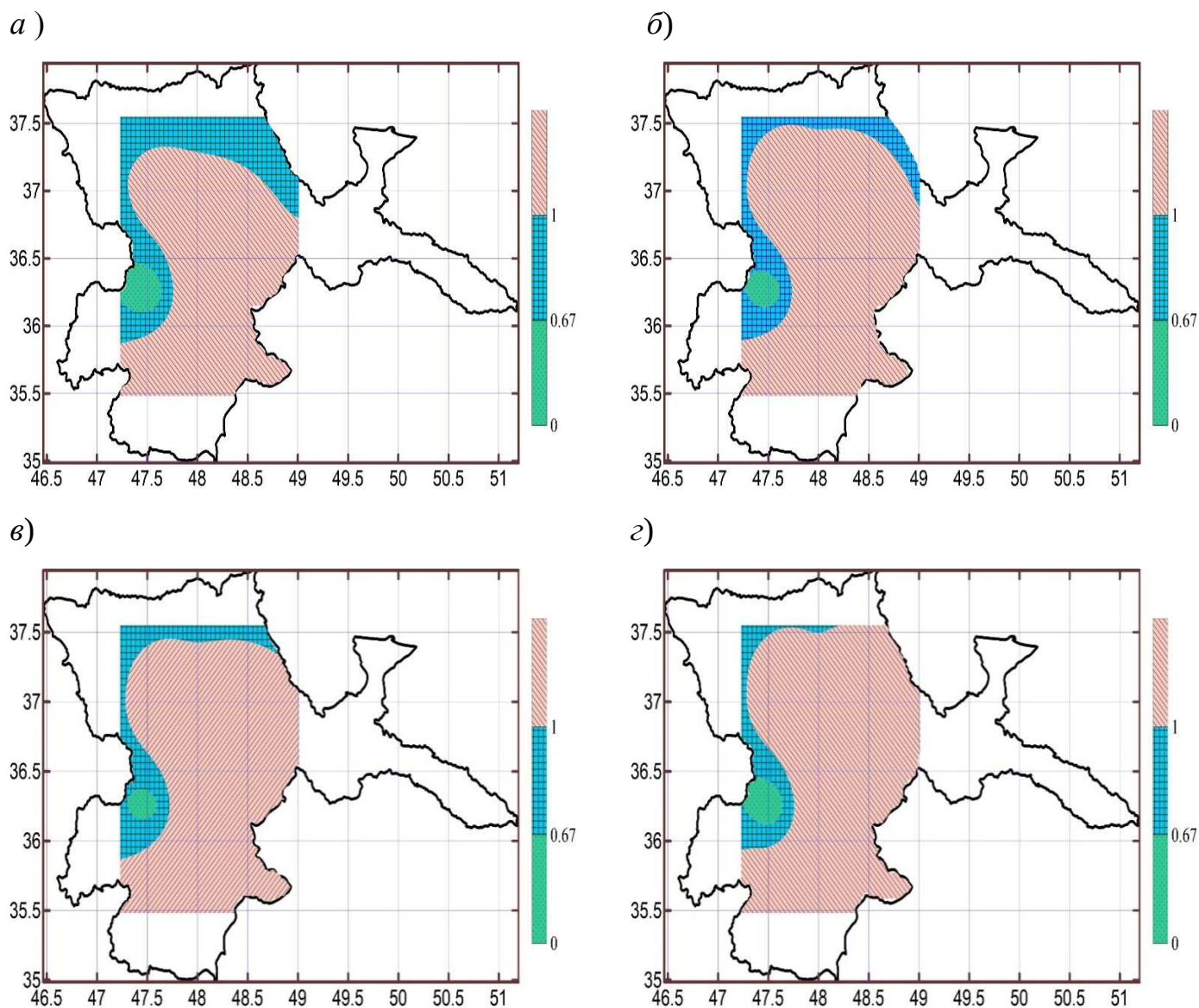


Рисунок В.10 – Распределение критерия β в бассейне р. Сефидруд:

a – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6;

б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6;

в – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5;

з – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

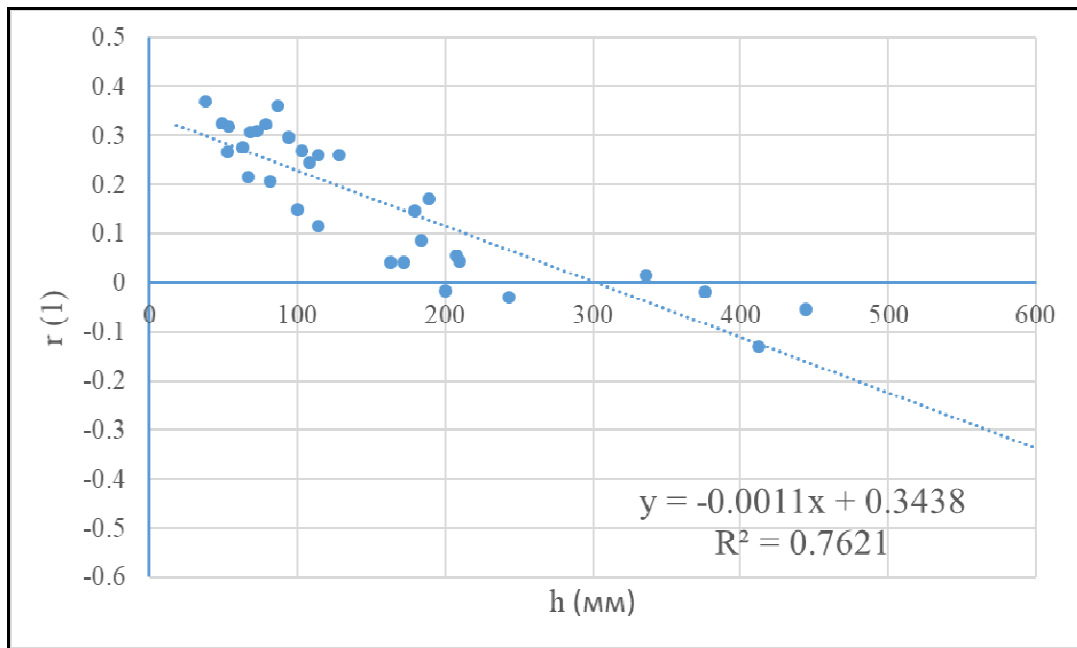


Рисунок В.11 – Зависимость коэффициента автокорреляции от слоя стока для бассейнов р. Карун и Сефидруд.

Таблица В.5 – Обеспеченные величины испарения бассейна р. Карун, вычисленного методом водного баланса, для современных и сценарных климатических условий

Пост	Фактические испарения (с 1957 по 2005)			Прогнозные испарения					
				РТК 2,6					
	$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$	с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
				$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$	$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$
<i>Rahim Abad</i>	755	649	509	743	648	520	798	694	556
<i>Dorud</i>	645	566	454	687	595	477	722	627	504
<i>Sepid dast (sezar)</i>	648	569	464	746	641	514	785	675	541
<i>Tange Panj (sezar)</i>	608	528	411	902	670	435	928	698	462
<i>Behsht Abad</i>	439	396	333	424	387	335	469	429	371
<i>Dashte bozorg</i>	557	463	338	702	538	356	743	583	399

Продолжение таблицы В.5

Пост	Фактические испарения (с 1957 по 2005)			Прогнозные испарения					
				РТК 8,5					
	$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$	с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
				$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$	$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$
<i>Rahim Abad</i>	755	649	509	757	657	525	758	648	508
<i>Dorud</i>	645	566	454	696	603	482	674	583	466
<i>Sepid dast (sezar)</i>	648	569	464	750	646	519	782	657	511
<i>Tange Panj (sezar)</i>	608	528	411	920	685	445	847	638	422
<i>Behsht Abad</i>	439	396	333	443	402	345	424	386	332
<i>Dashte bozorg</i>	557	463	338	759	583	387	932	661	382

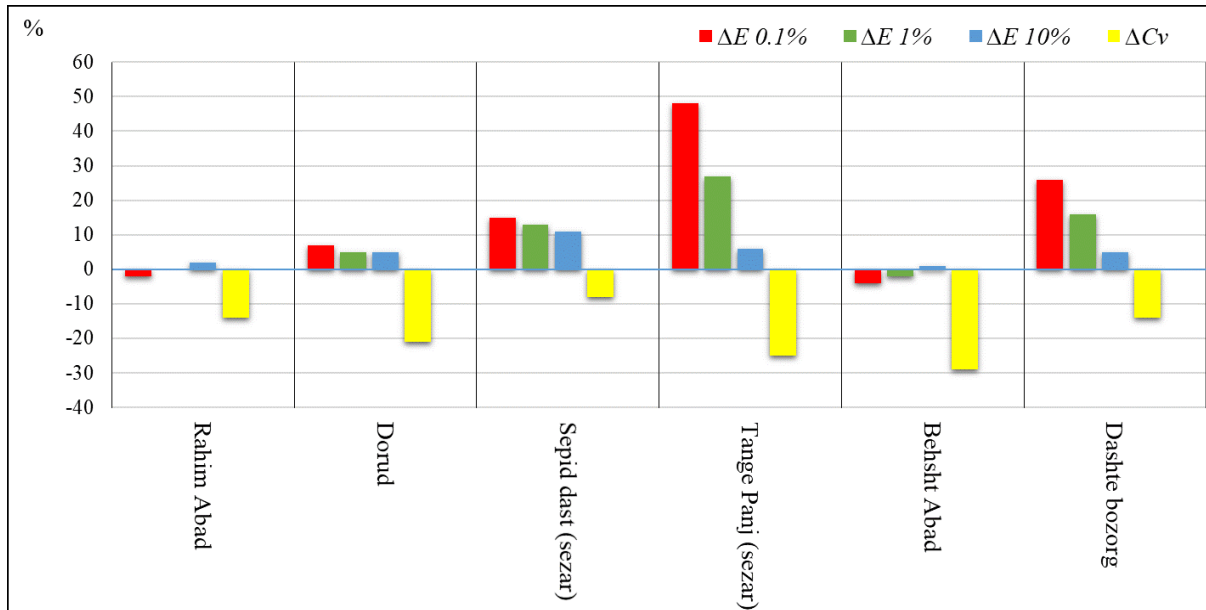
Таблица В.6 –Обеспеченные величины испарениябассейна р. Сефидруд, вычисленного методом водного баланса, для современных и сценарных климатических условий

Пост	Фактические испарения (с 1957 по 2005)			Прогнозные испарения					
				РТК 2,6					
	$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$	с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
				$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$	$E_{0,1\%}$	$E_{1\%}$	$E_{10\%}$
<i>Binalud</i>	544	434	311	587	480	359	588	480	360
<i>Salamat Abad</i>	454	403	338	572	484	384	579	486	382

Продолжение Таблицы В.6

<i>Hashtad Joft</i>	527	459	368	608	530	425	591	513	412
<i>Gragoni-Ghezelozon</i>	497	412	319	597	486	368	611	493	370
<i>Pole Dokhtar</i>	479	410	329	568	481	381	581	490	386
<i>Moter Khane</i>	422	356	270	389	338	273	401	350	282
<i>Ostor</i>	423	368	303	504	432	349	521	447	361
<i>Gilave</i>	435	378	310	473	412	339	499	437	361
<i>Mahneshan-Ghezelozon</i>	479	405	321	681	574	454	689	577	452
<i>Shadi Abad-Cheshme shor</i>	531	477	406	575	513	433	574	513	434
<i>Binalud</i>	544	434	311	560	458	344	579	472	352
<i>Salamat Abad</i>	454	403	338	560	470	369	602	497	381
<i>Hashtad Joft</i>	527	459	368	578	502	402	590	514	412
<i>Gragoni-Ghezelozon</i>	497	412	319	578	468	352	620	498	369
<i>Pole Dokhtar</i>	479	410	329	551	467	370	587	493	385
<i>Moter Khane</i>	422	356	270	375	327	263	383	333	269
<i>Ostor</i>	423	368	303	456	406	341	517	442	355
<i>Gilave</i>	435	378	310	459	406	339	490	426	349
<i>Mahneshan-Ghezelozon</i>	479	405	321	654	549	431	701	583	451
<i>Shadi Abad-Cheshme shor</i>	531	477	406	540	487	417	599	515	417

а)



б)

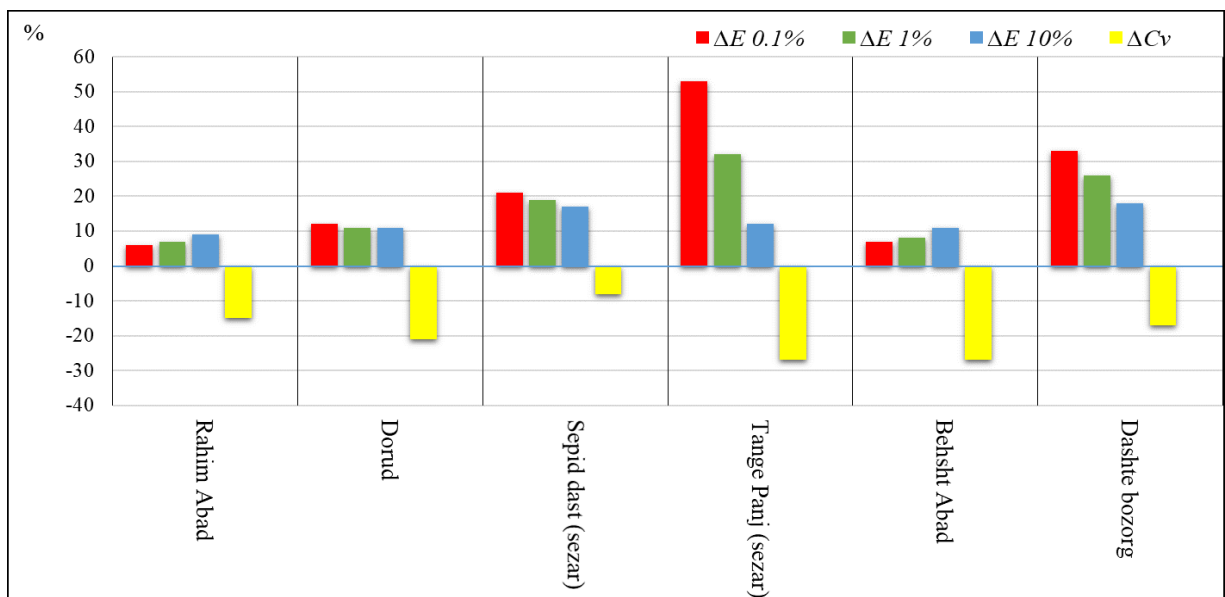
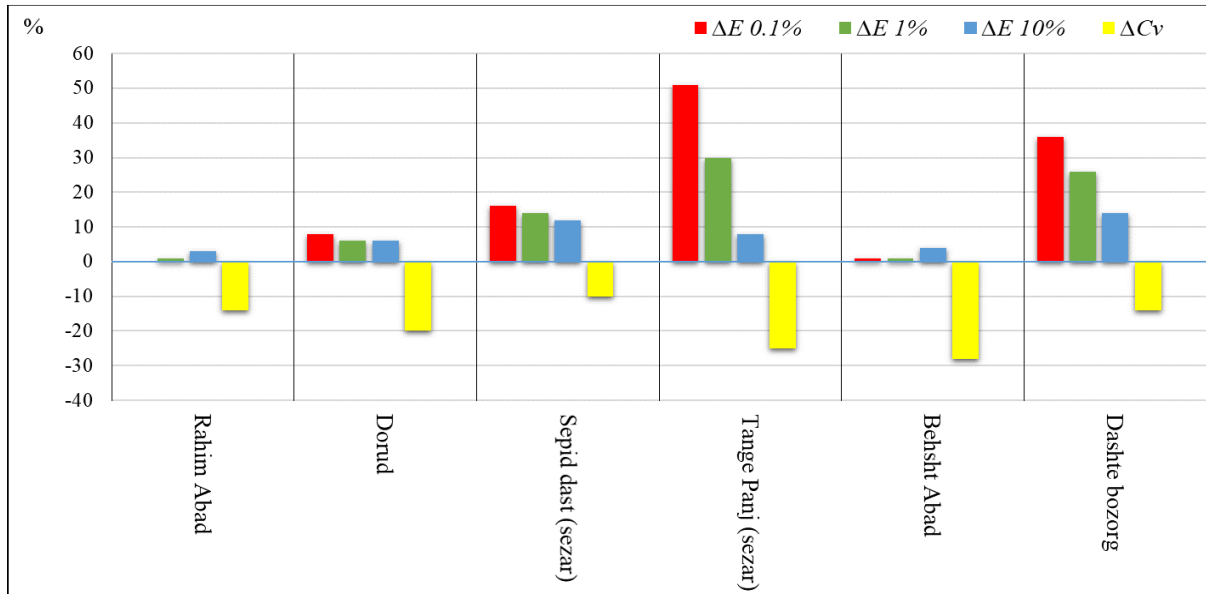


Рисунок В.12– Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик испарения с бассейна р. Карун: а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6; б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6.

a)



б)

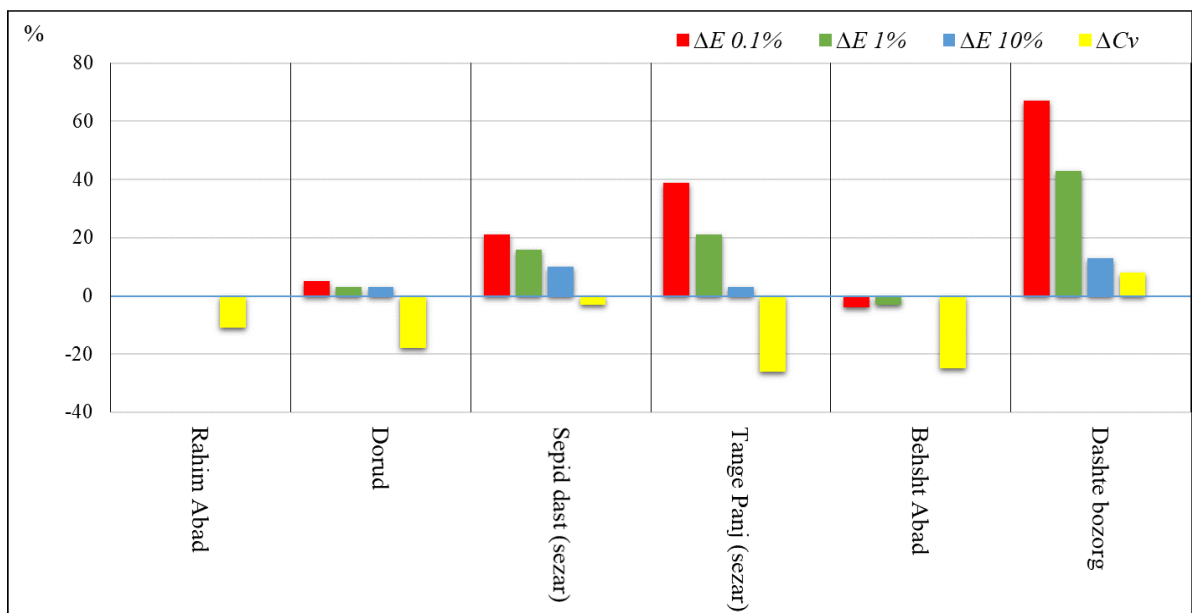
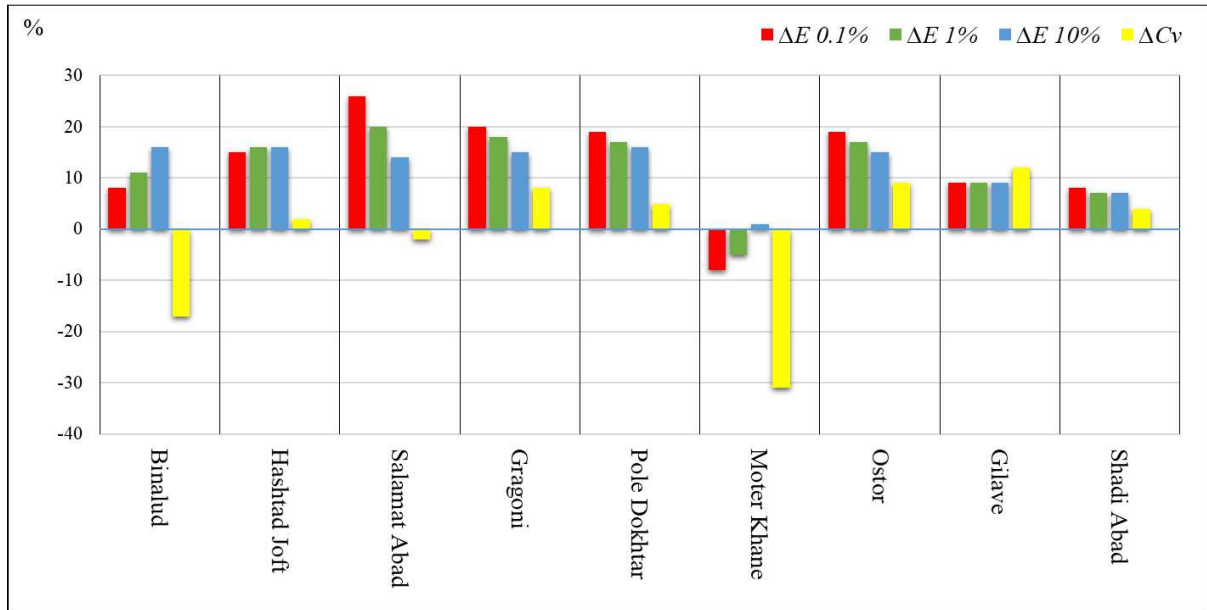


Рисунок В.13—Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик испарения с бассейна р. Карун: *а* – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5; *б* – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

a)



b)

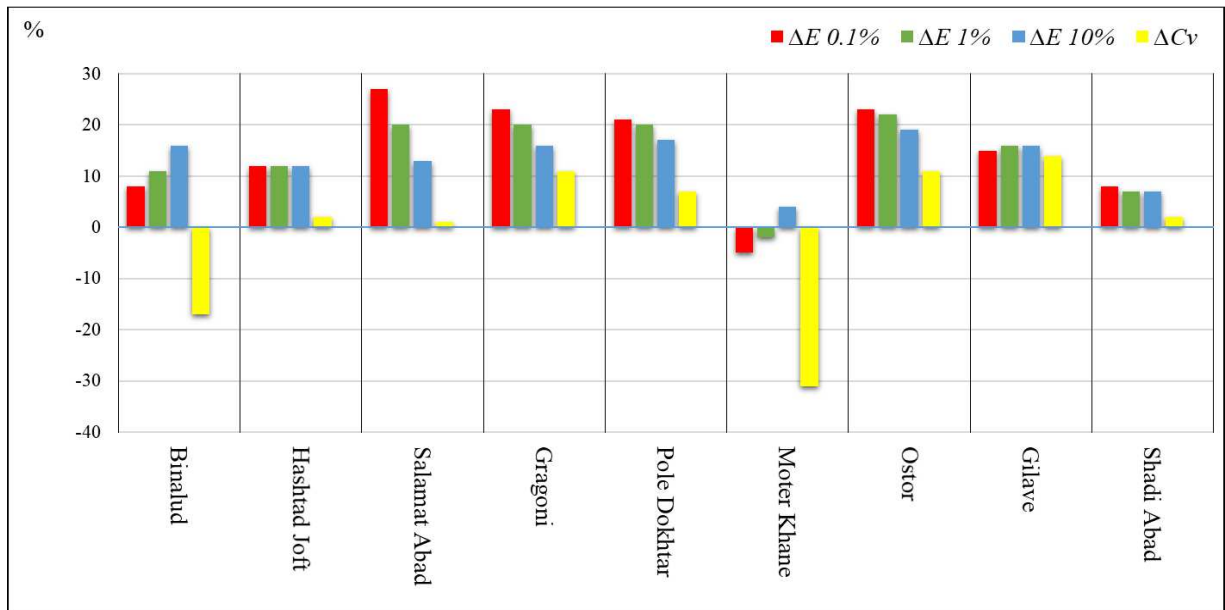
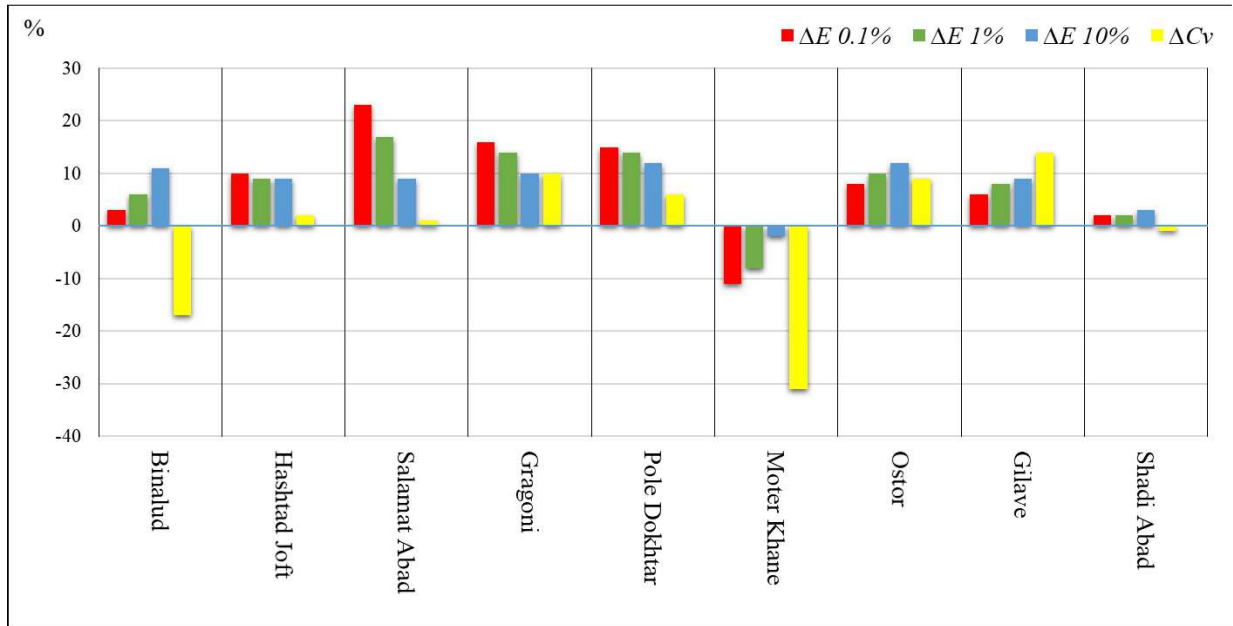


Рисунок В.14—Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик испарения с бассейна р. Сефидруд: *a* – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 2,6; *б* – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 2,6.

a)



б)

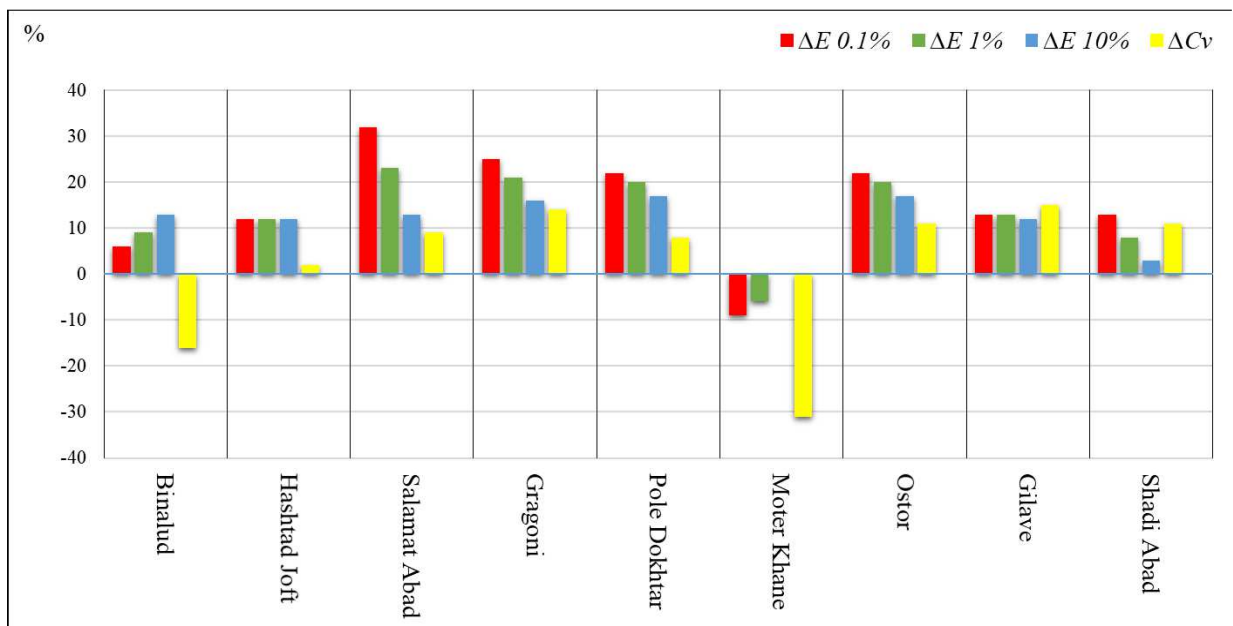
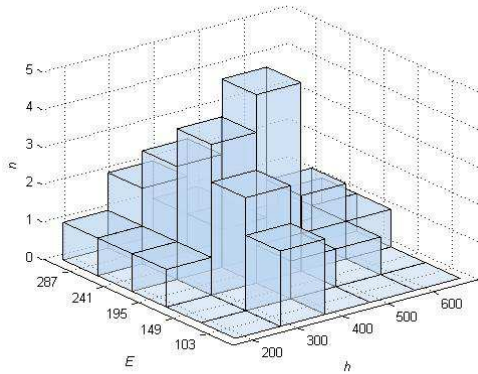


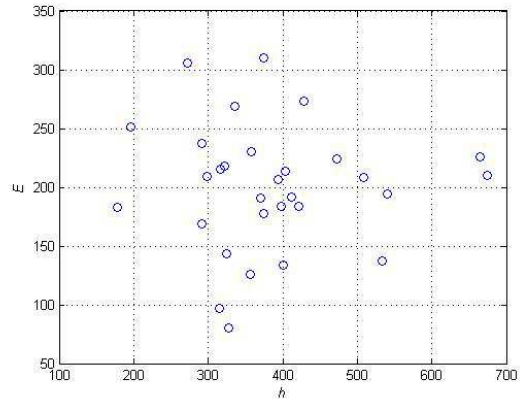
Рисунок В.15—Гистограмма относительных изменений вероятностных характеристик испарения с бассейна р. Сефидруд: а – период с 2020 по 2049 климатический сценарий 8,5; б – период с 2050 по 2079 климатический сценарий 8,5.

Приложение Г – Эмпирические гистограммы, эллипсы рассеивания и поверхности вероятности

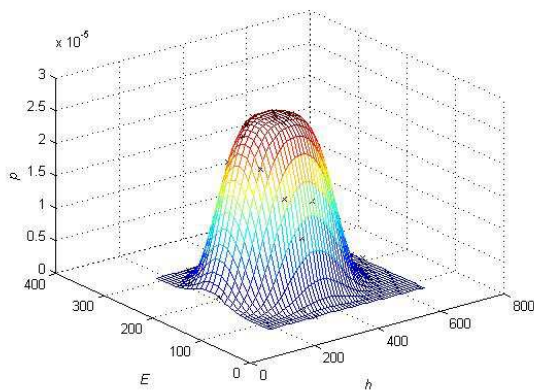
а)



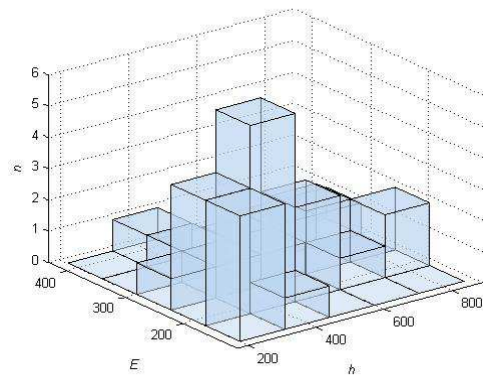
б)



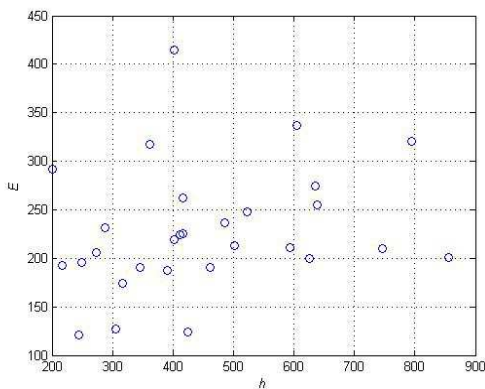
в)



г)



д)



ж)

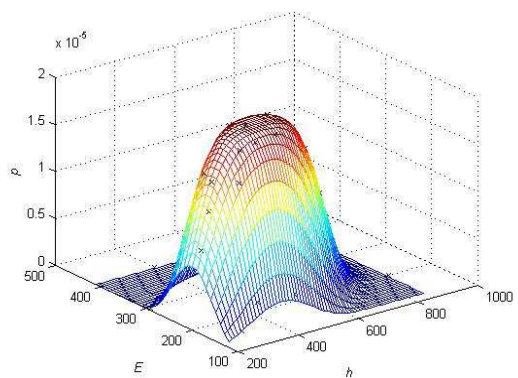
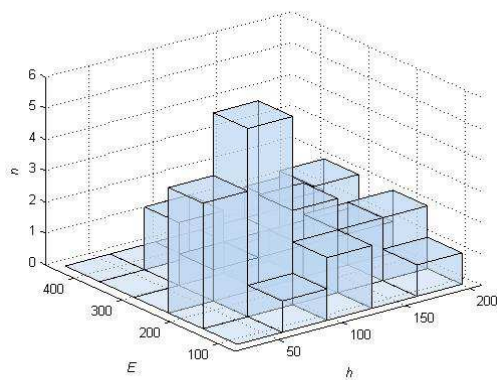
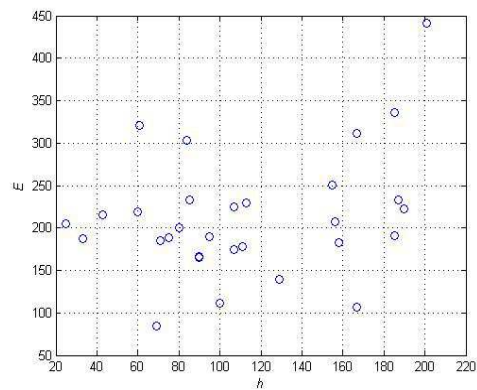


Рисунок Г.1 – *Armand*: а – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Barez*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

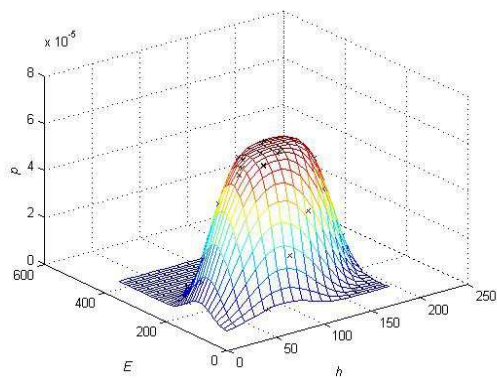
а)



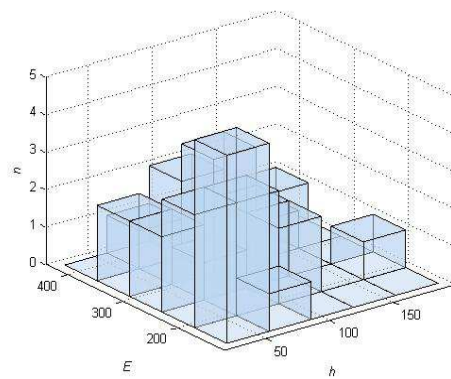
б)



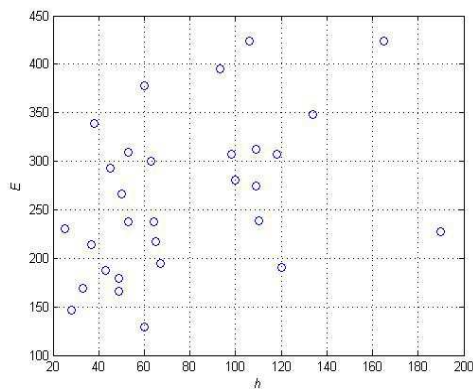
в)



г)



д)



ж)

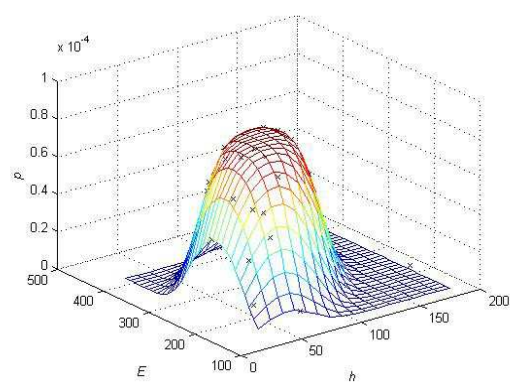
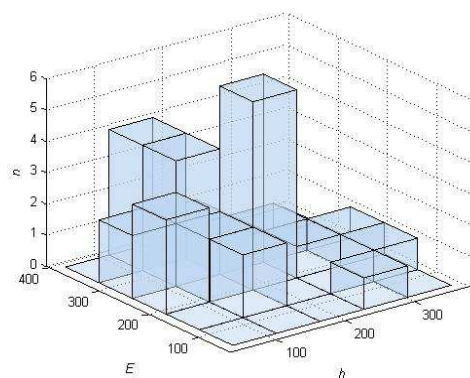
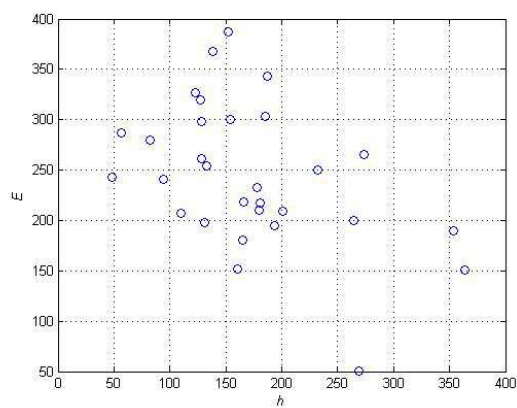


Рисунок Г.2 – *Binalud*: а – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности; *Gilave*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности.

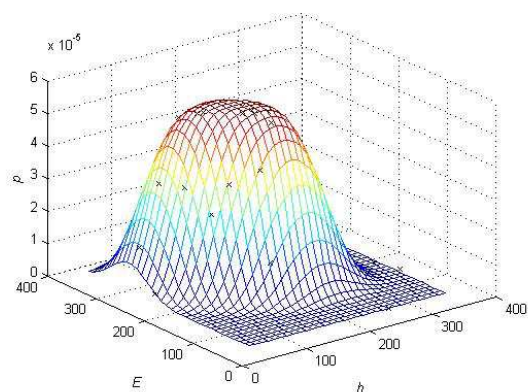
а)



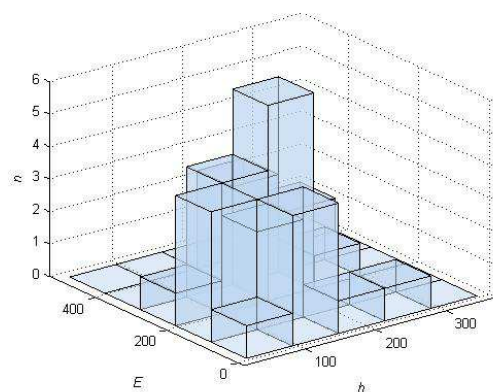
б)



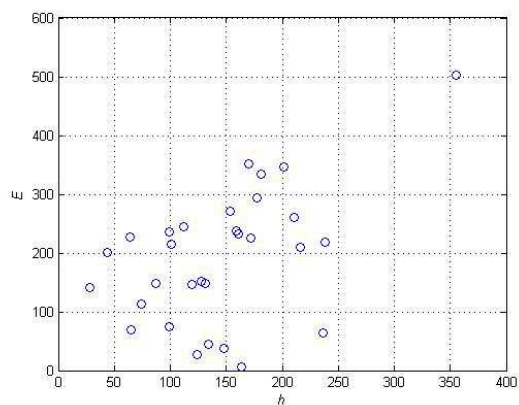
в)



г)



д)



ж)

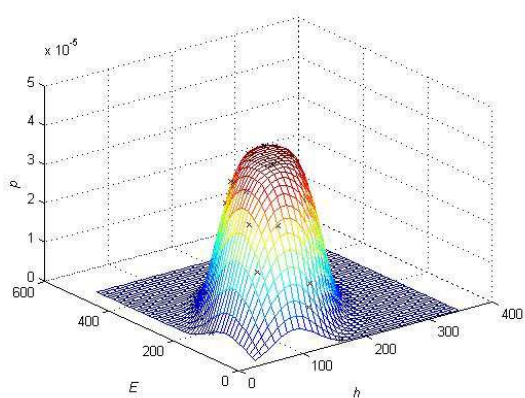
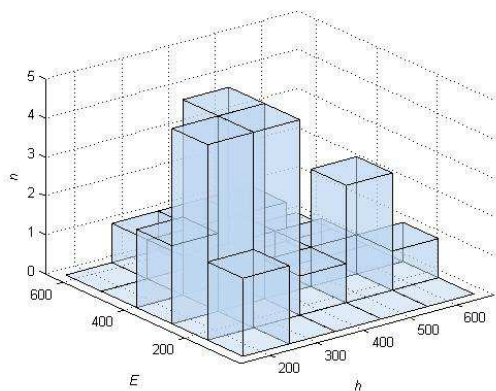
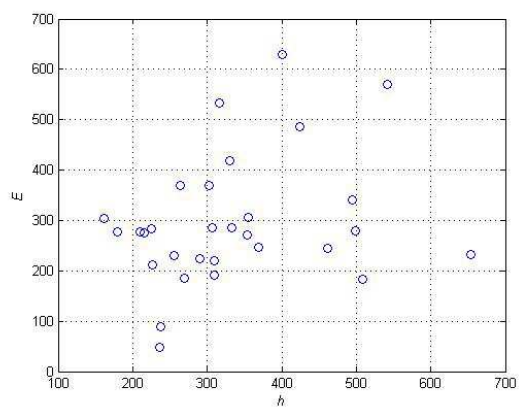


Рисунок Г.3 – *Behesht Abada* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Dashte Bozorg*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

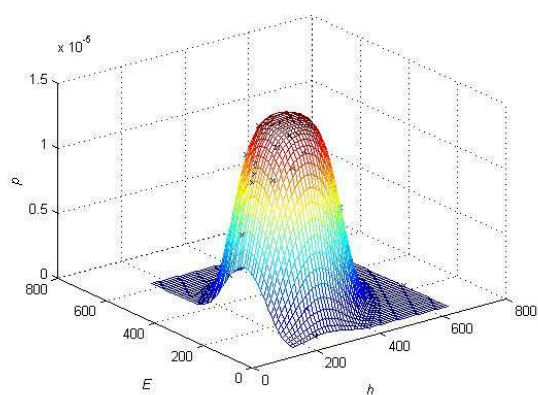
а)



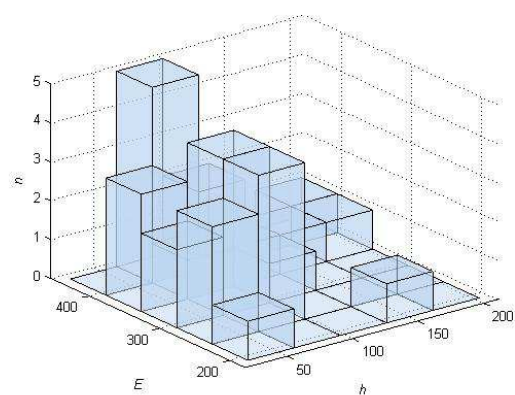
б)



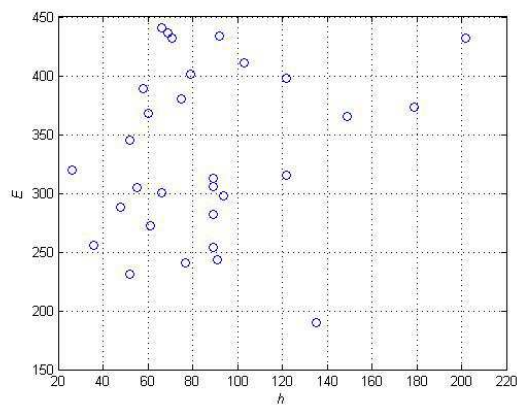
в)



г)



д)



ж)

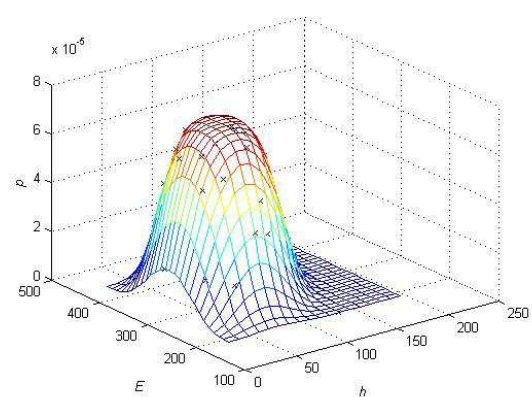
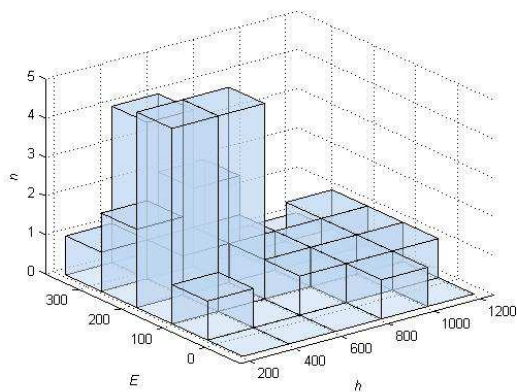
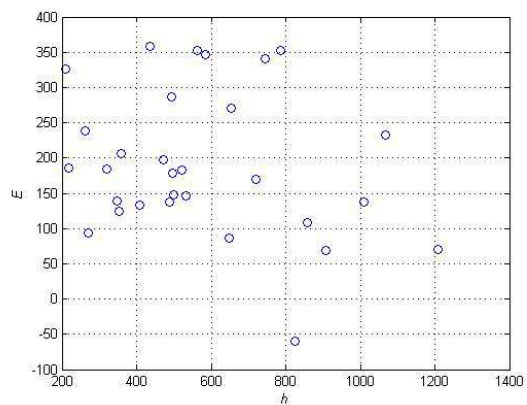


Рисунок Г.4 – *Kataa* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *KoheSokhte*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

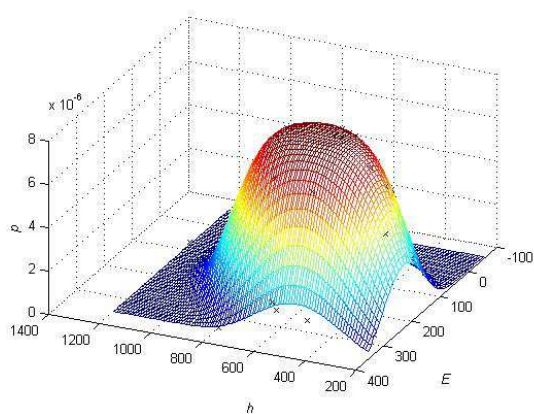
а)



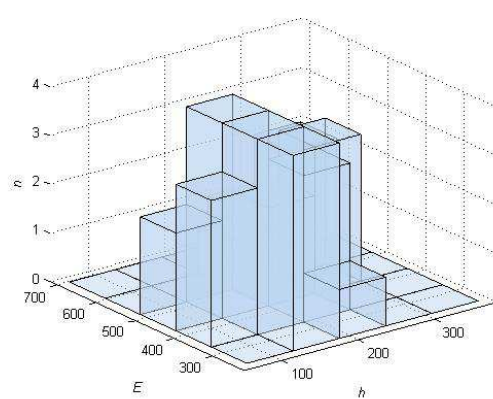
б)



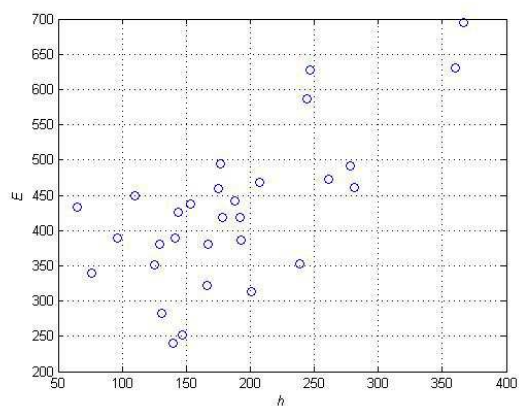
в)



г)



д)



ж)

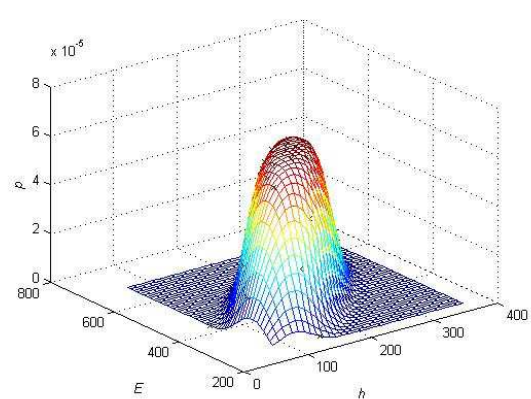
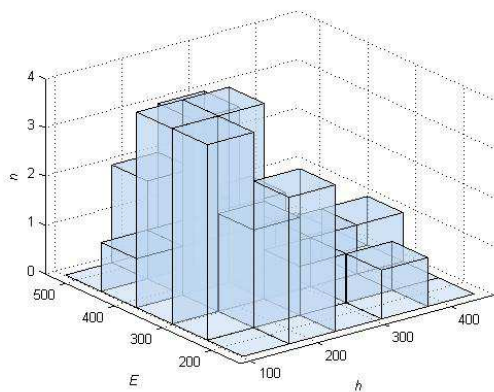
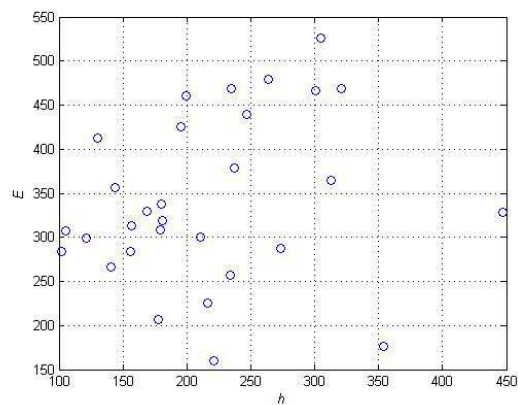


Рисунок Г.5 – *Patavea* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Polekarakhbast*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

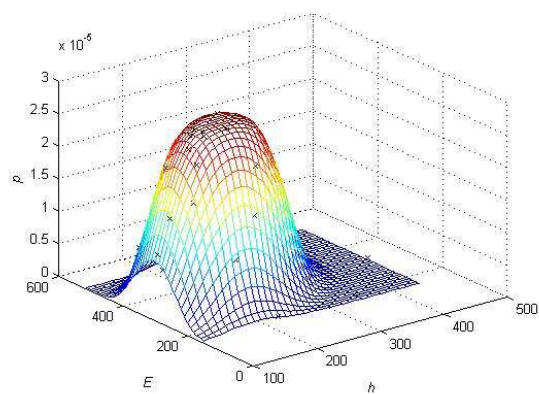
а)



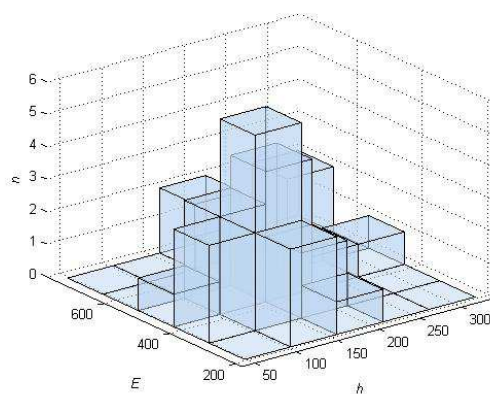
б)



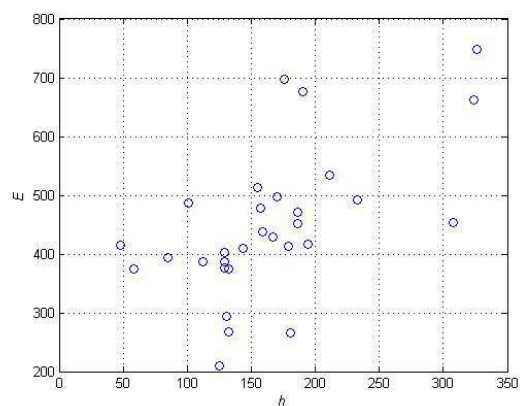
в)



г)



д)



ж)

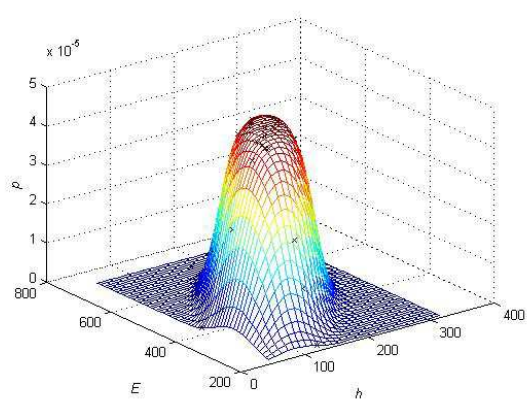
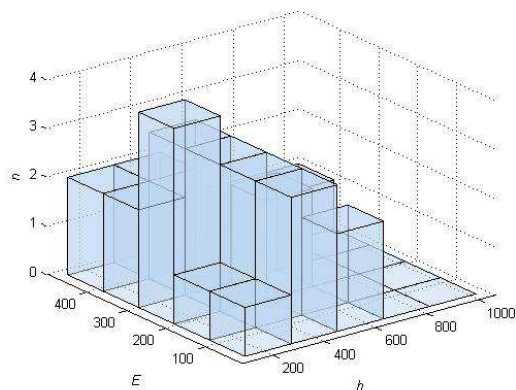
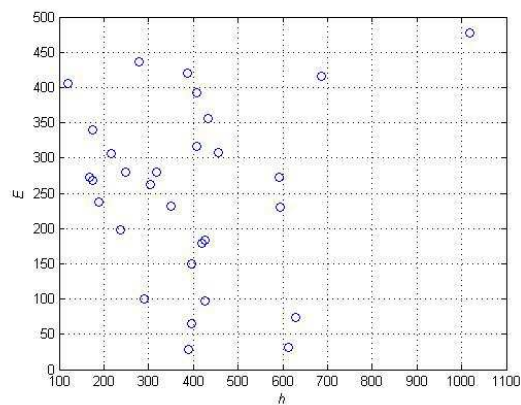


Рисунок Г.6 – *Sepid dash Sezara* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Solegan.*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

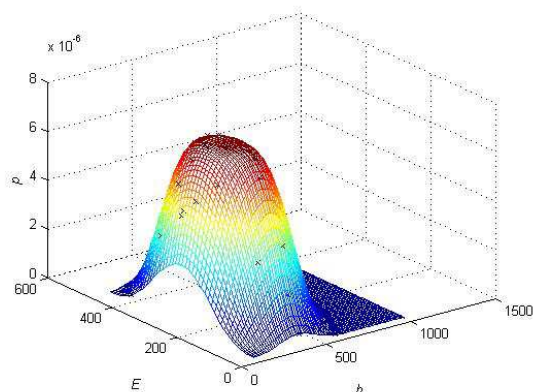
а)



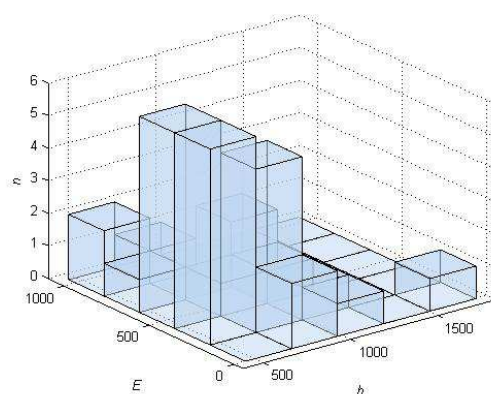
б)



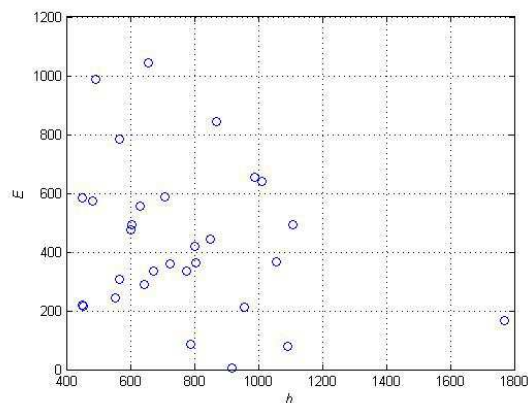
в)



г)



д)



ж)

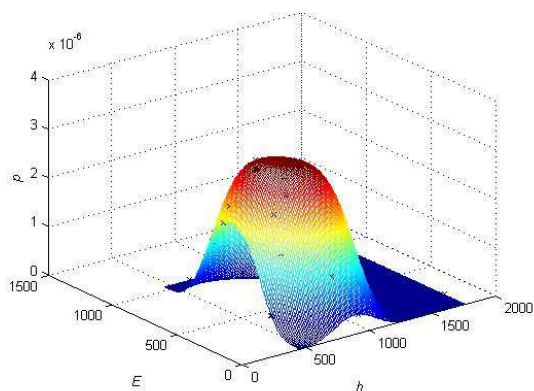
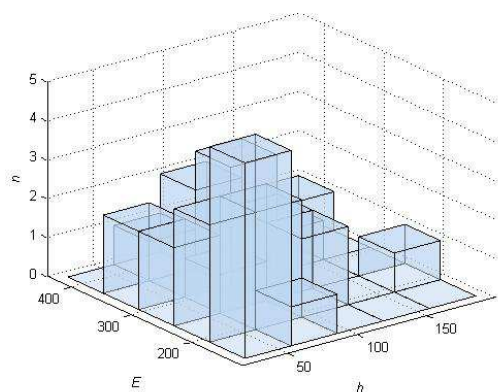
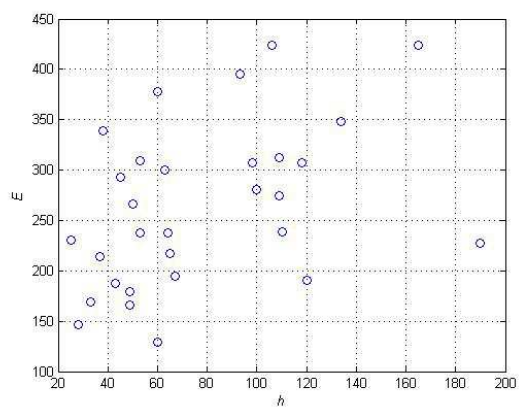


Рисунок Г.7 – *Tange Panj Sezara* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Tange Panj Bakhtyari*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

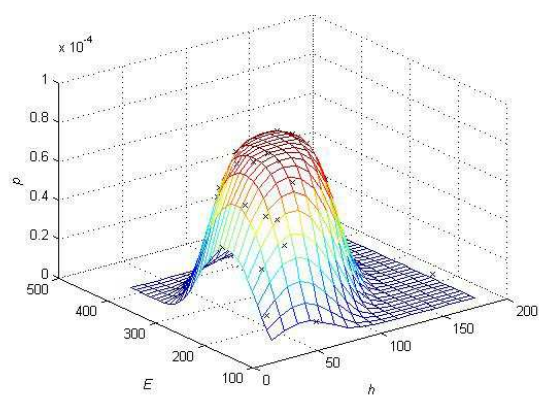
а)



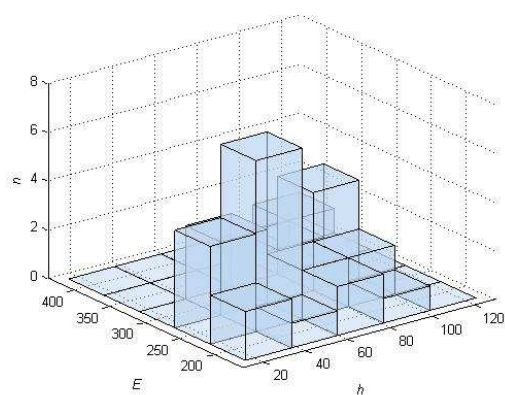
б)



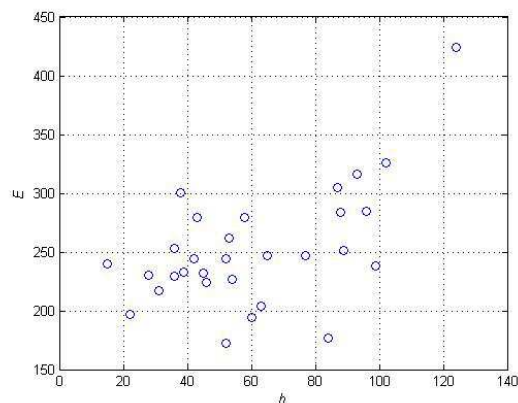
в)



г)



д)



ж)

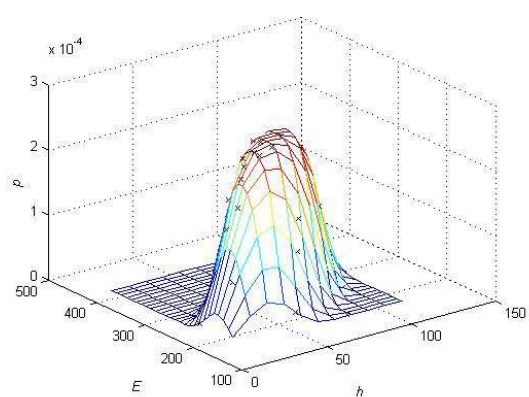
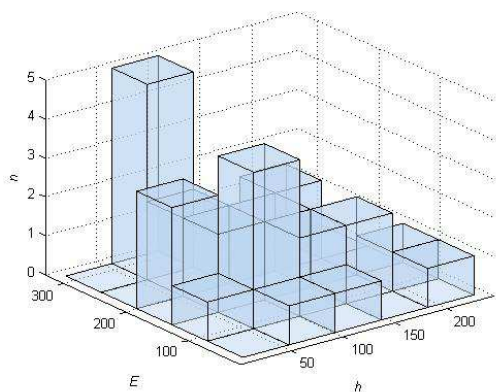
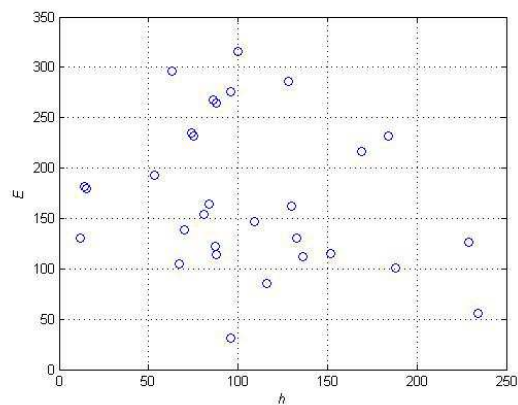


Рисунок Г.8 – *Hashtad Jofta* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Ghrah Goni*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

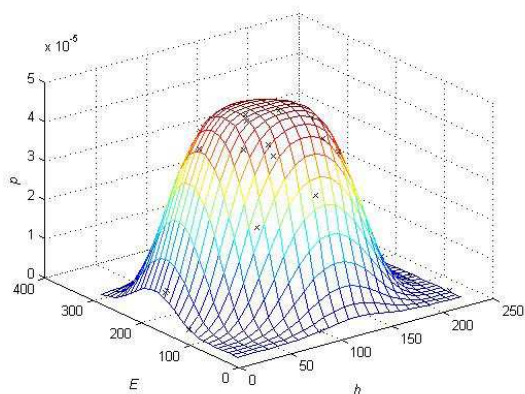
а)



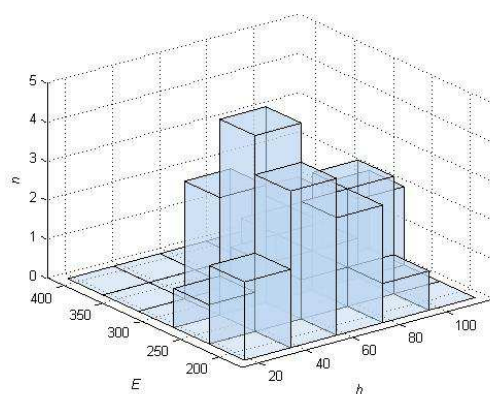
б)



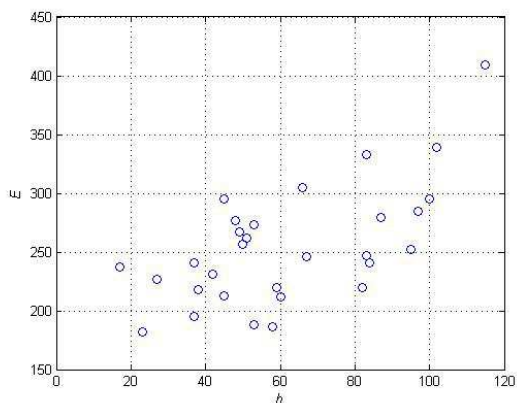
в)



г)



д)



ж)

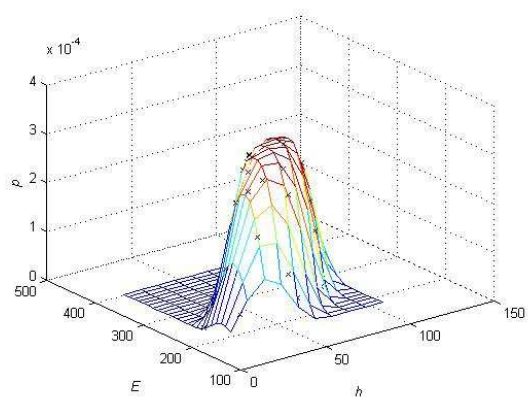
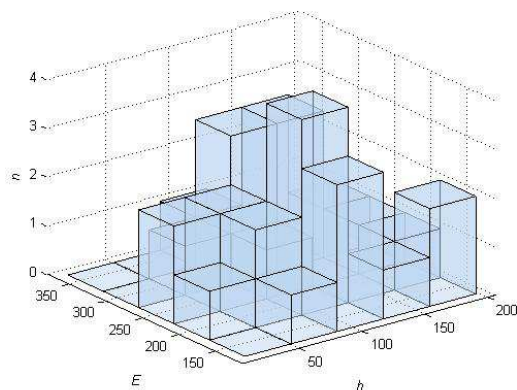
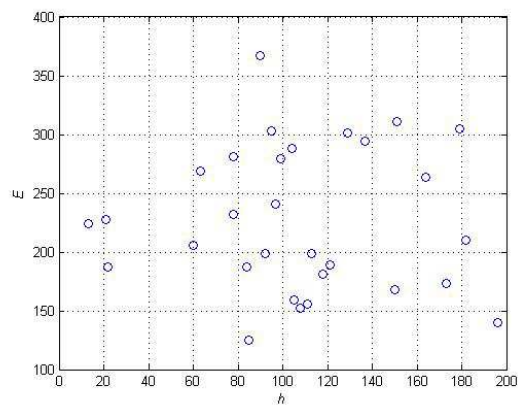


Рисунок Г.9– *Motor Khanea* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Mah neshan*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

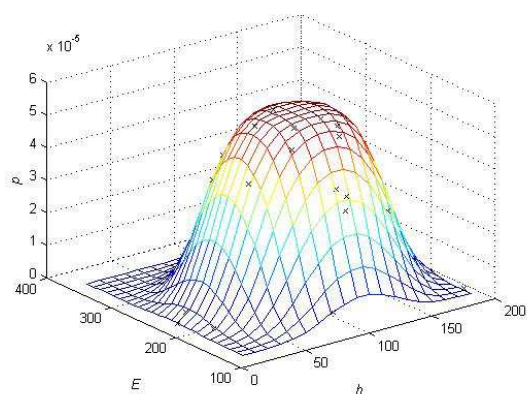
а)



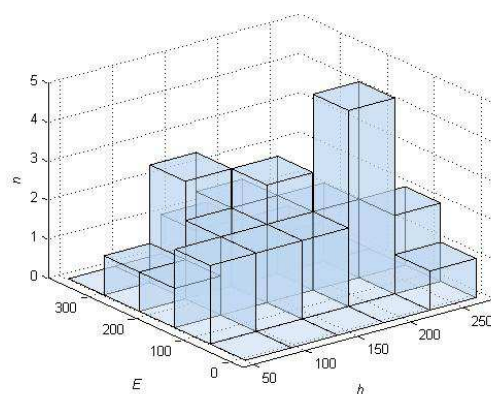
б)



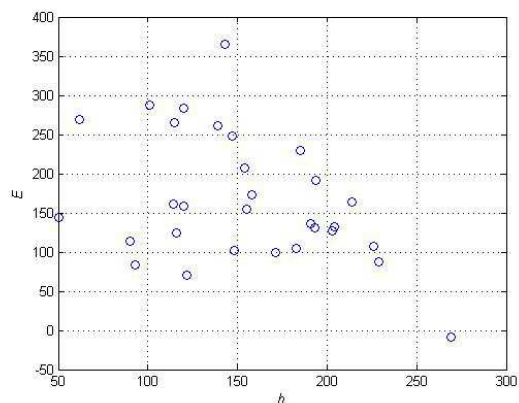
в)



г)



д)



ж)

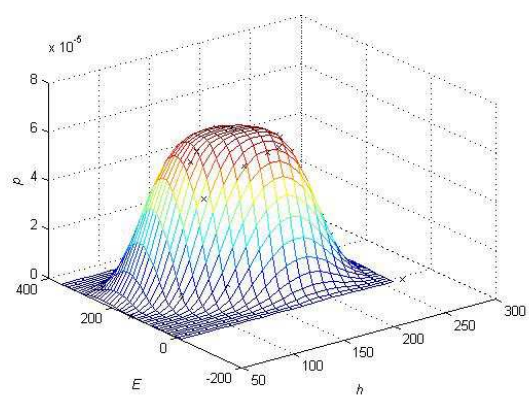
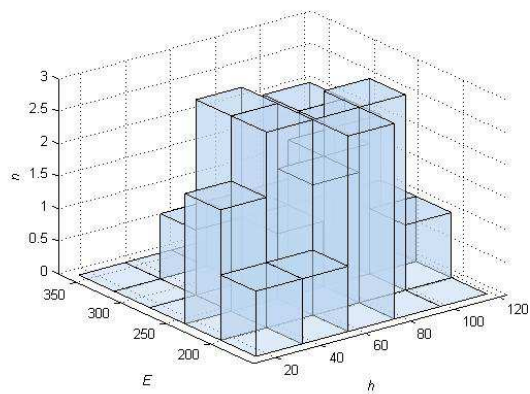
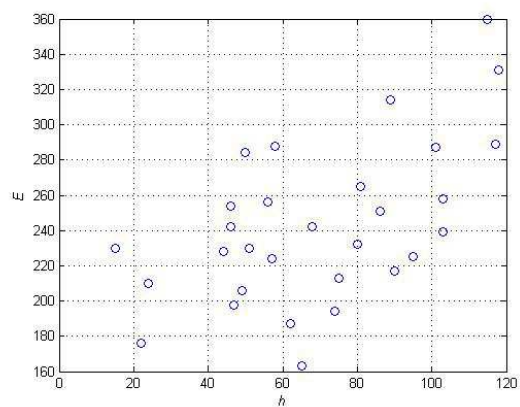


Рисунок Г.10 – *Myane Share Chaia* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Myane Grango*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

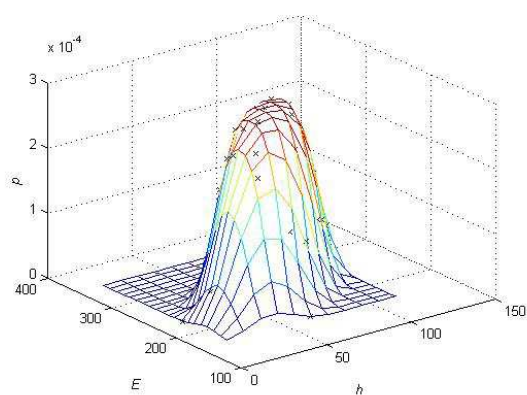
а)



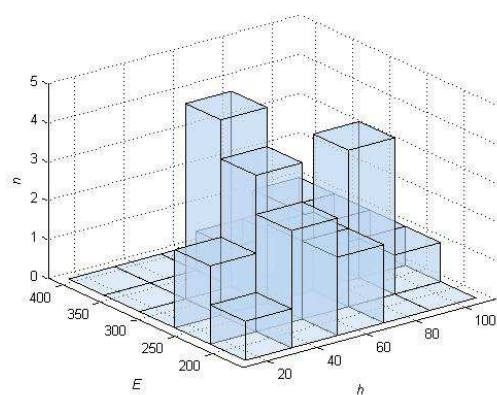
б)



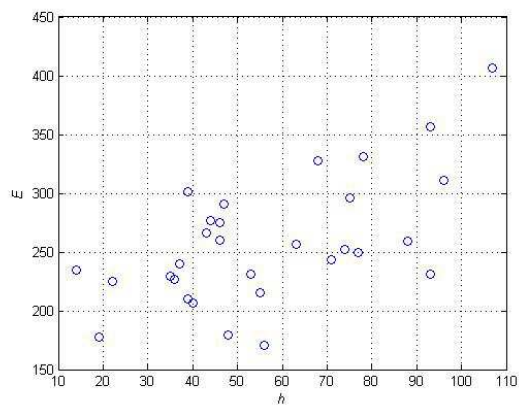
в)



г)



д)



ж)

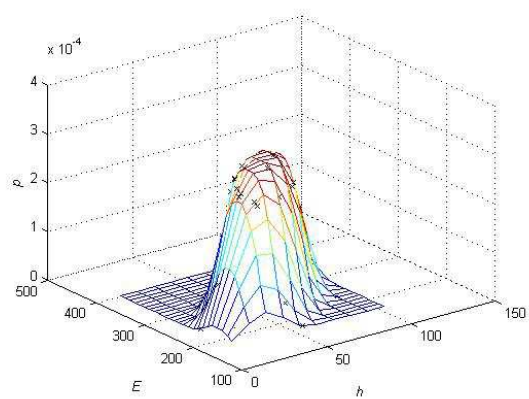
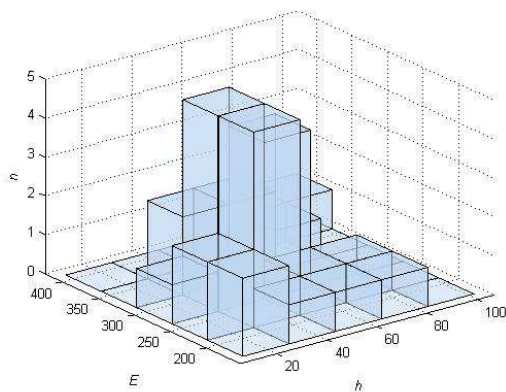
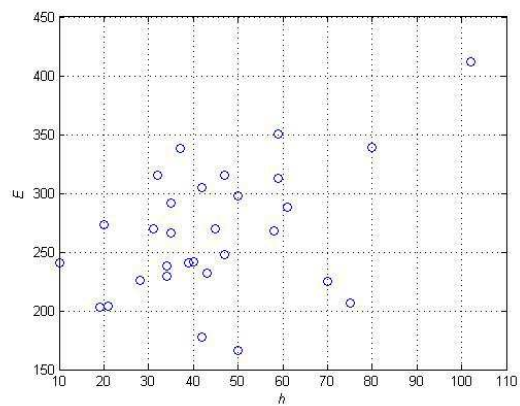


Рисунок Г.11 – *Ostor a* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Pole Dokhtar*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

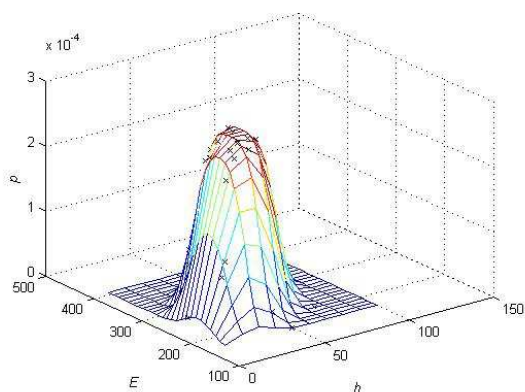
а)



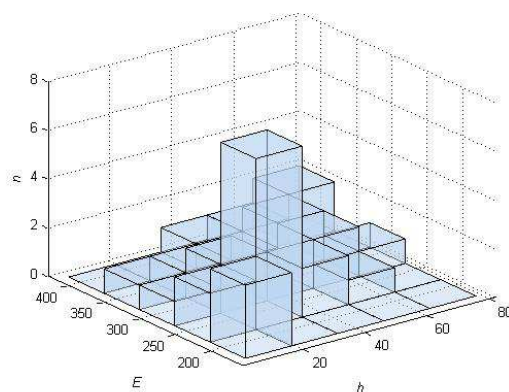
б)



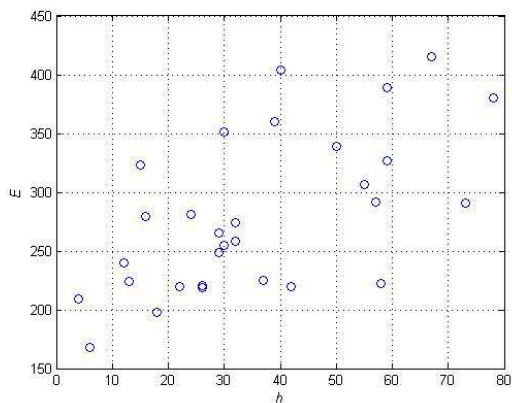
в)



г)



д)



ж)

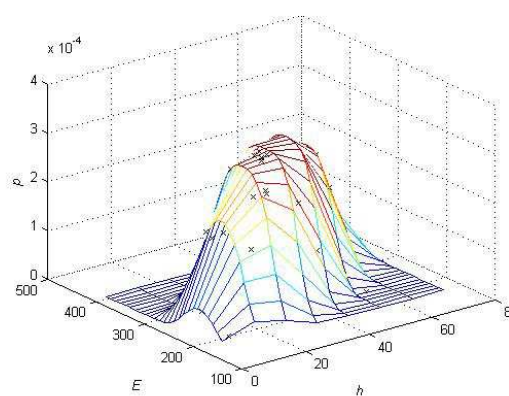
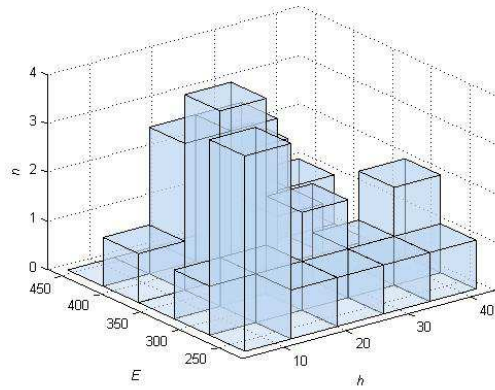
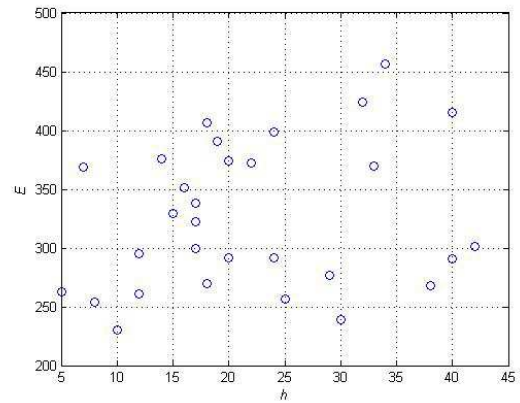


Рисунок Г.12– *Salamat Abada* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Sarcham*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

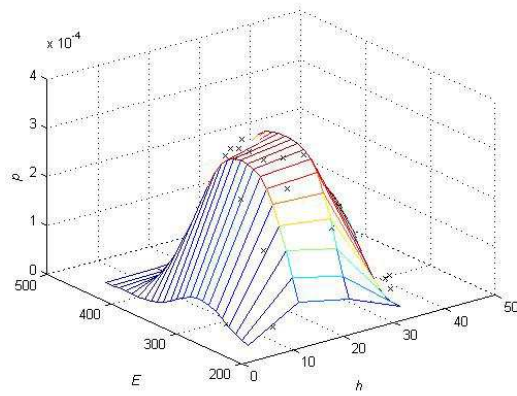
а)



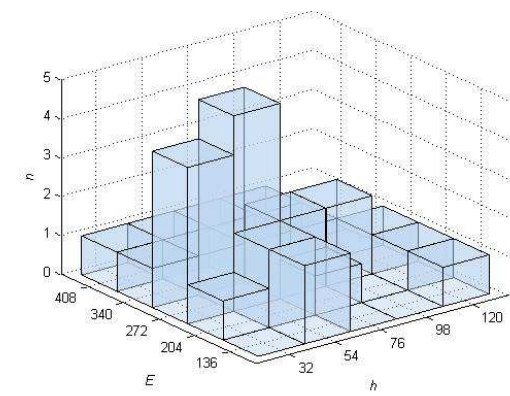
б)



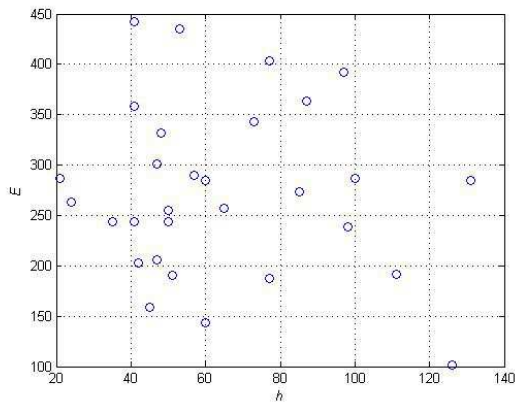
в)



г)



д)



ж)

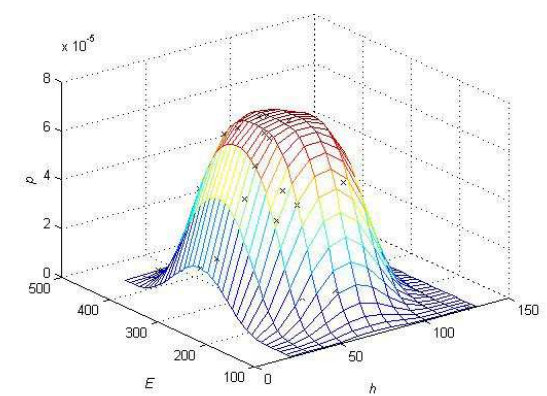
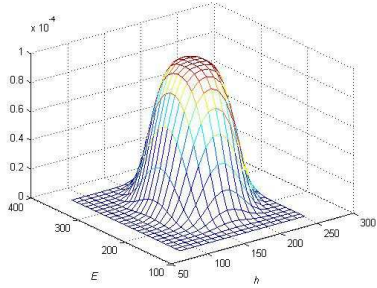


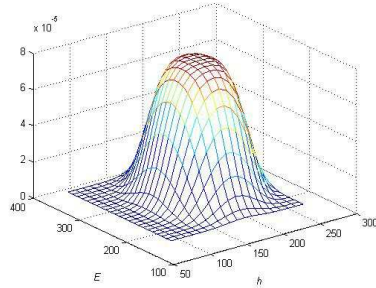
Рисунок Г.13 – *Shadi Abad* а – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, б – эллипсы рассеивания, в – трехмерная плотность вероятности, *Yenikand*: г – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, д – эллипсы рассеивания, ж – трехмерная плотность вероятности

Приложения Д – Прогнозные поверхности вероятности

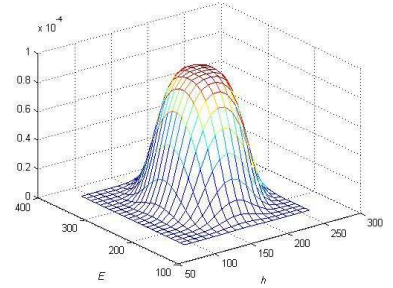
а)



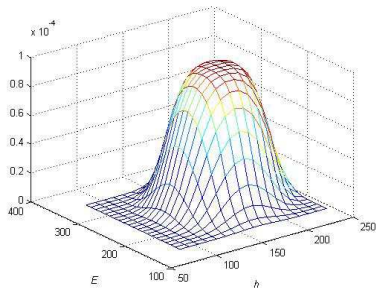
б)



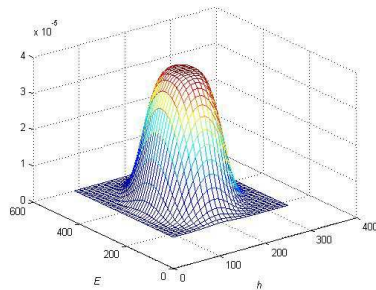
в)



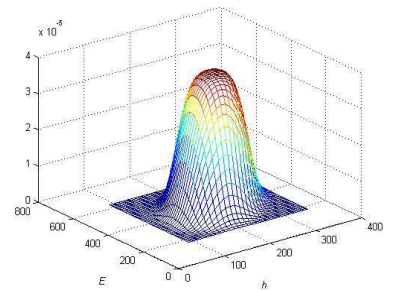
д)



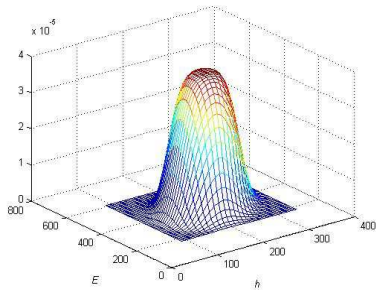
е)



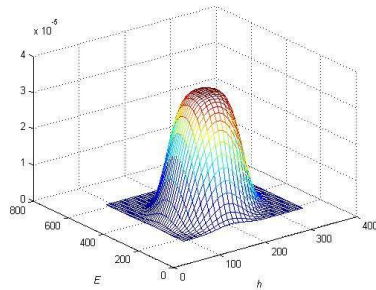
е)



з)



и)



к)

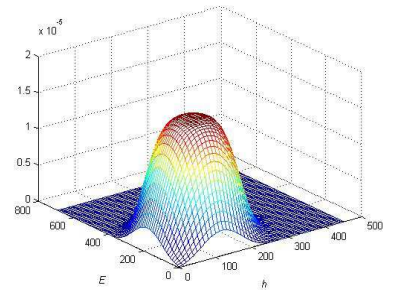
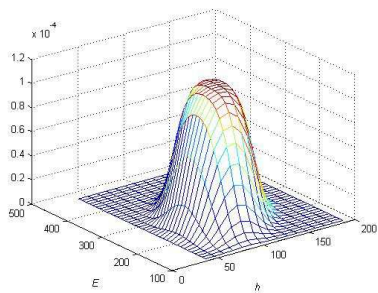
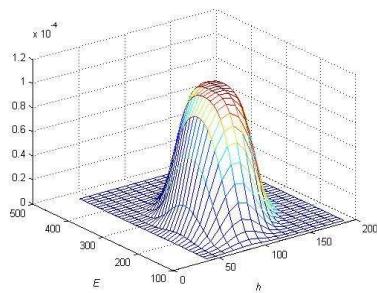


Рисунок Д.1 –Поверхность плотности *Behesht Abada*– РТК 2,6_I, б– РТК 2,6 _II, в– РТК 8,5 _I, д – РТК 8,5 _II, *Sepid dash (Sezar)* е – РТК 2,6 _I, e – РТК 2,6 _II, з – РТК 8,5 _I, и – РТК 8,5 _II, и *Dashte bozorg* к – РТК 8,5 _II.

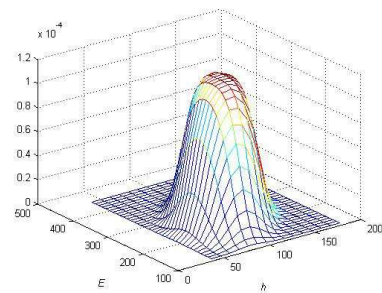
a)



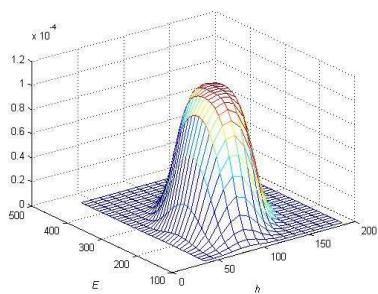
б)



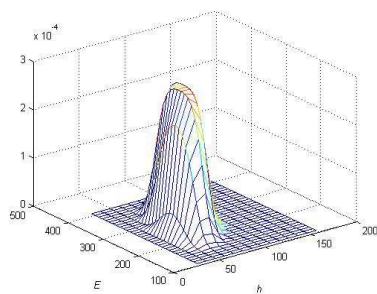
в)



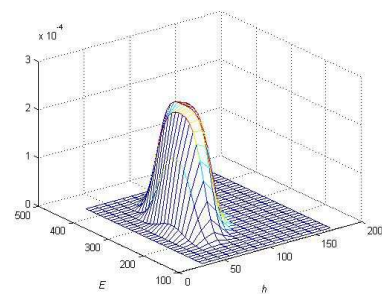
д)



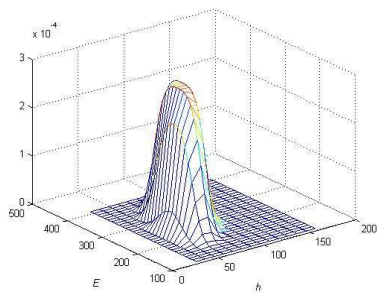
г)



е)



з)



и)

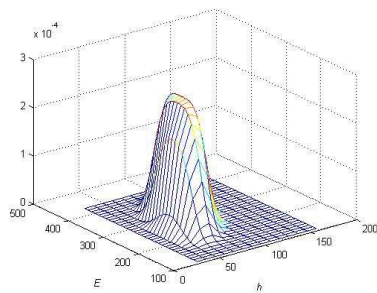
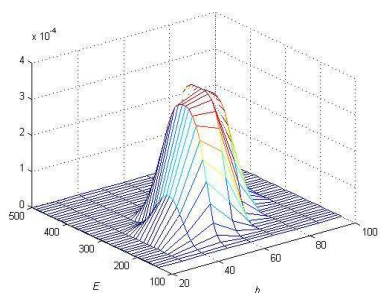
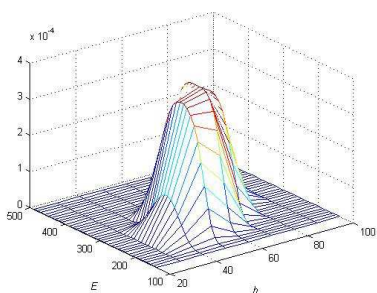


Рисунок Д.2 – Поверхность плотности *Binaluda*– РТК 2,6_I, б– РТК 2,6_II, в– РТК 8,5_I, д – РТК 8,5_II, *Gilave* г – РТК 2,6_I, е – РТК 2,6_II, з – РТК 8,5_I, и – РТК 8,5_II.

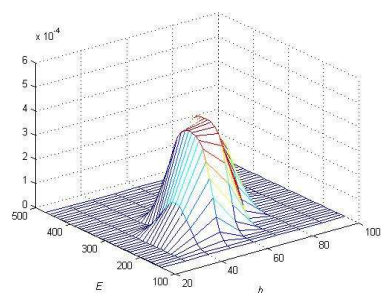
a)



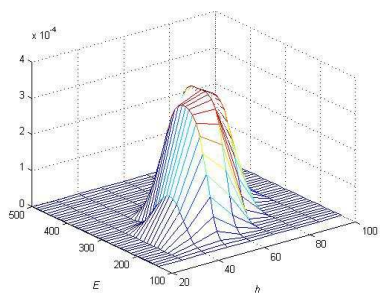
б)



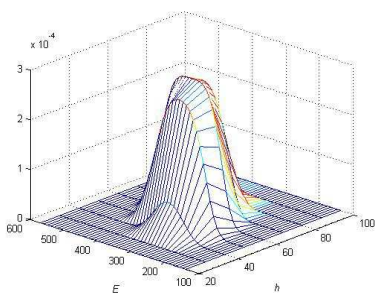
в)



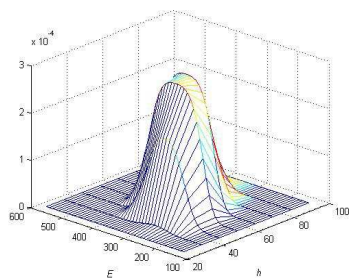
г)



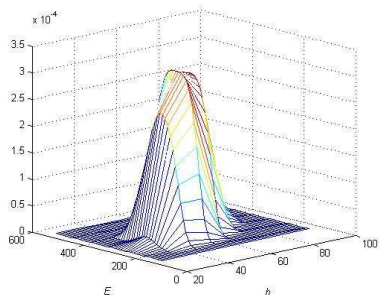
г)



е)



з)



и)

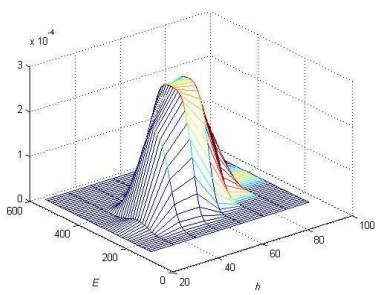
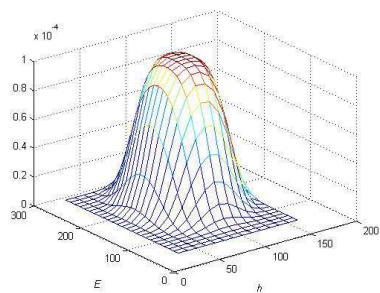
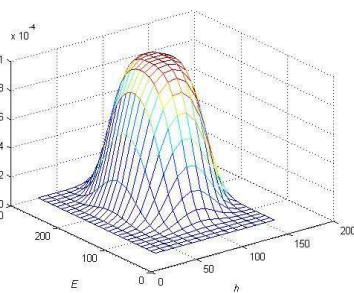


Рисунок Д.3 – Поверхность плотности *Gragonia*– РТК 2,6_I, б– РТК 2,6 _II, в– РТК 8,5 _I, д – РТК 8,5 _II, *Mahneshan* г – РТК 2,6 _I, е – РТК 2,6 _II, з – РТК 8,5 _I, и – РТК 8,5 _II.

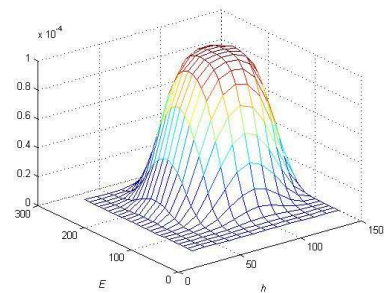
a)



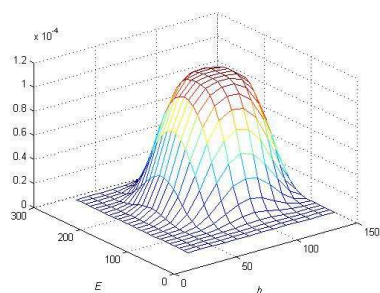
б)



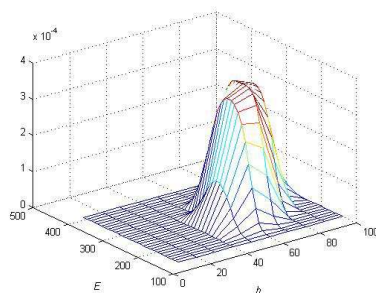
в)



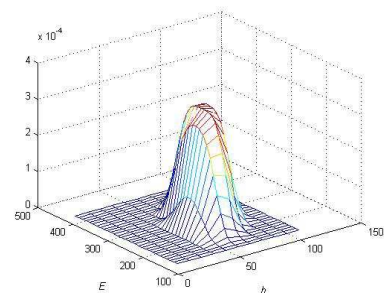
д)



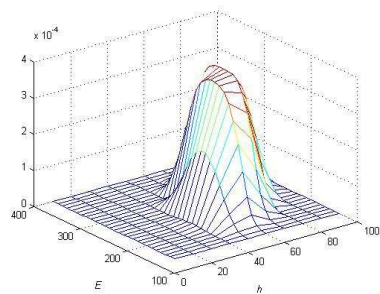
е)



е)



з)



и)

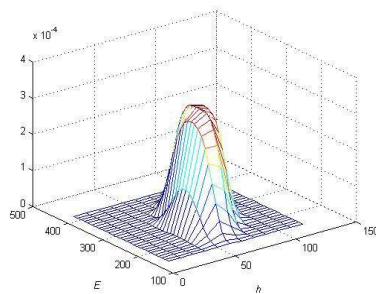
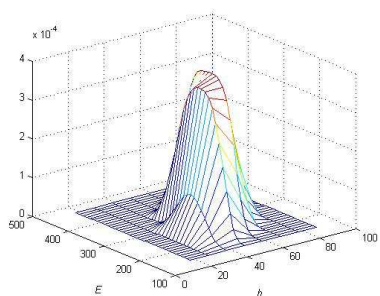
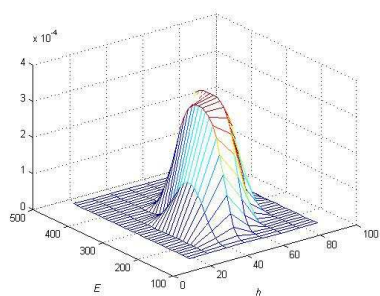


Рисунок Д.4 –Поверхность плотности *Motor Khanea*– РТК 2,6_I, б– РТК 2,6 _II, в– РТК 8,5 _I, д – РТК 8,5 _II, *Ostor* з – РТК 2,6 _I, е – РТК 2,6 _II, з – РТК 8,5 _I, и – РТК 8,5 _II.

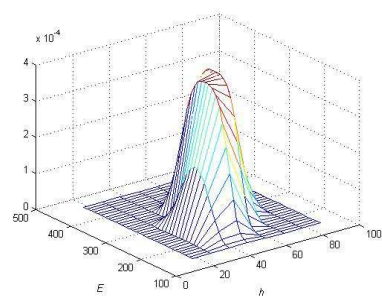
a)



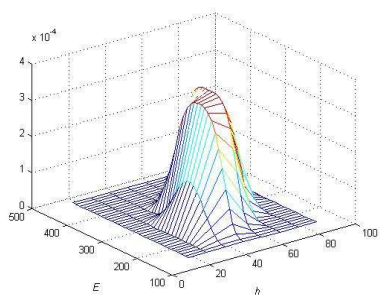
б)



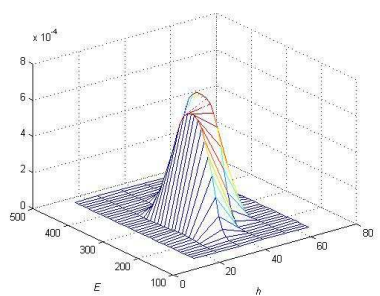
в)



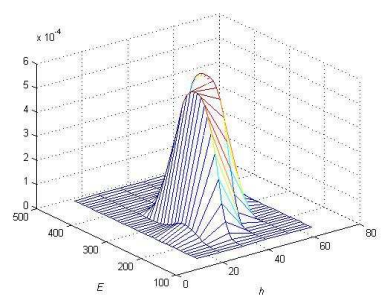
д)



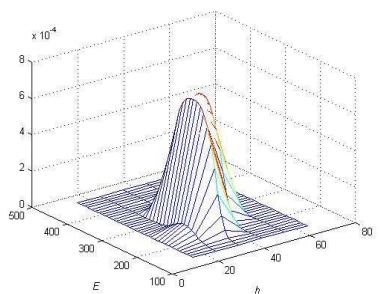
г)



е)



з)



и)

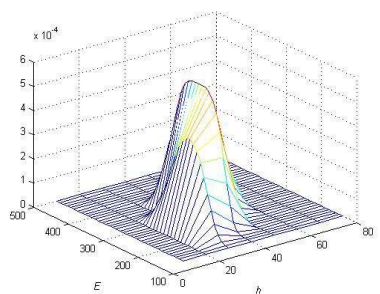
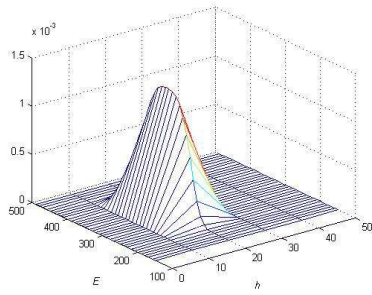
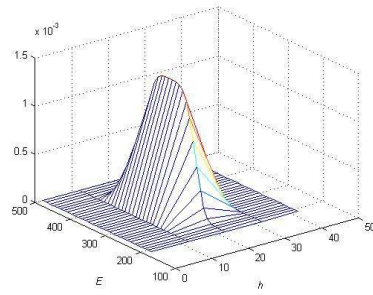


Рисунок Д.5 – Поверхность плотности *PoleDokhtara* – РТК 2,6_I, б – РТК 2,6_II, в – РТК 8,5_I, д – РТК 8,5_II, *Salamat Abad* – РТК 2,6_I, е – РТК 2,6_II, з – РТК 8,5_I, и – РТК 8,5_II.

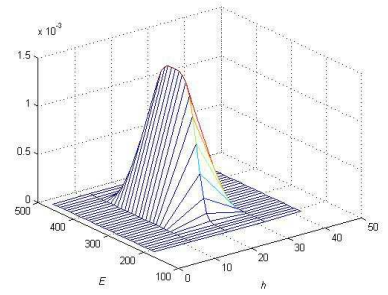
a)



б)



в)



д)

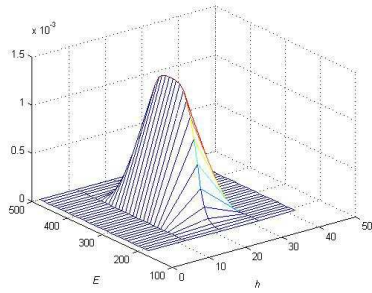
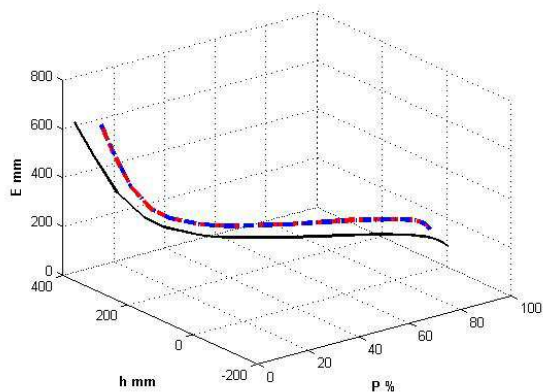


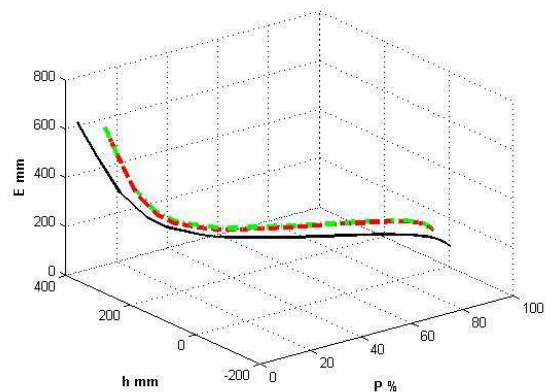
Рисунок Д.6 – Поверхность плотности *Shadi Abada* – РТК 2,6_I, б – РТК 2,6_II,
в – РТК 8,5_I, д – РТК 8,5_II.

Приложение Е – Кривые обеспеченности

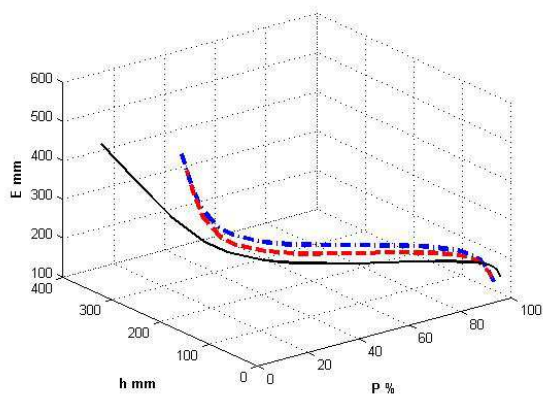
а)



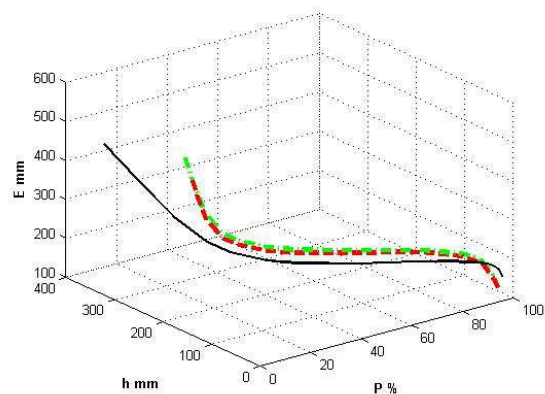
б)



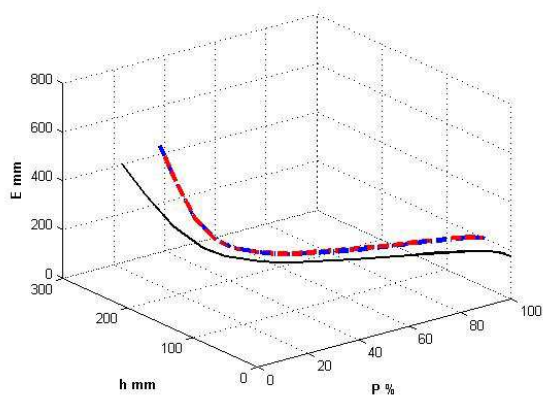
в)



г)



д)



жс)

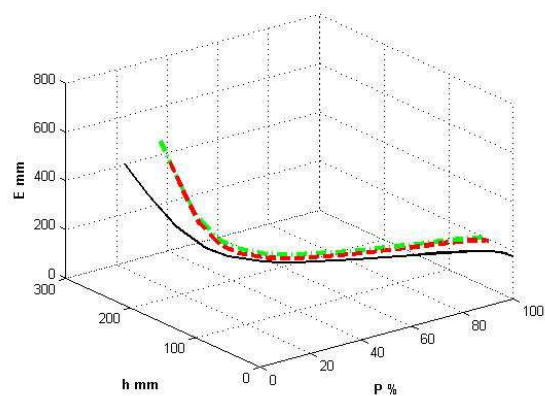
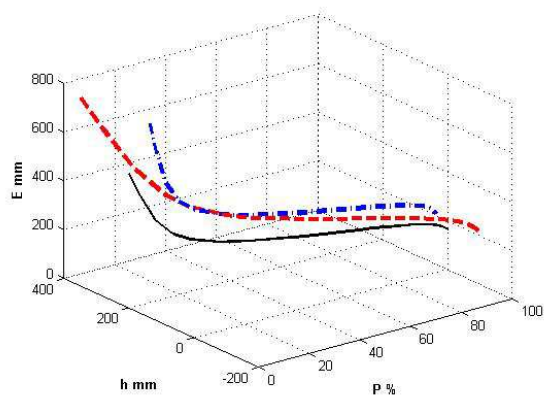
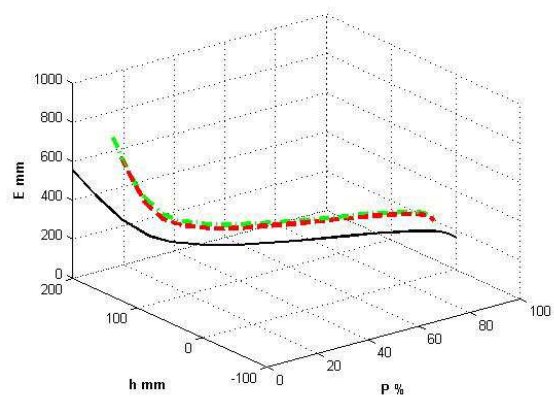


Рисунок Е.1 – Трехмерные кривые обеспеченности: а – *Binalud* (PTK 2,6), б – *Binalud* (PTK 8,5), в – *Gilave* (PTK 2,6), г – *Gilave* (PTK 8,5), д – *Gragoni* (PTK 2,6), жс – *Gragoni* (PTK 8,5)

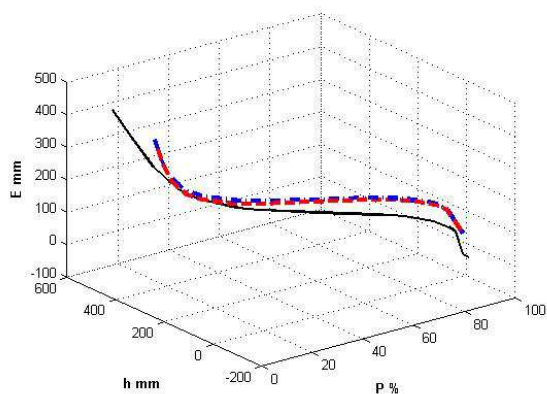
а)



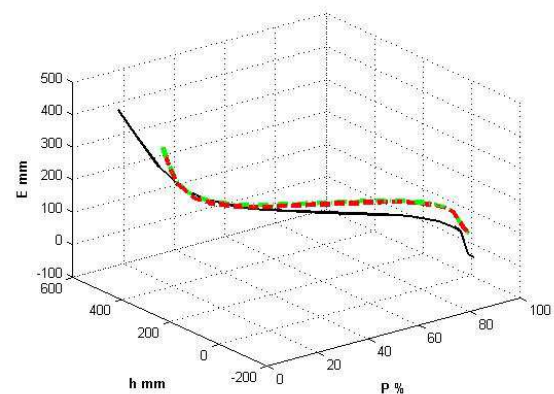
б)



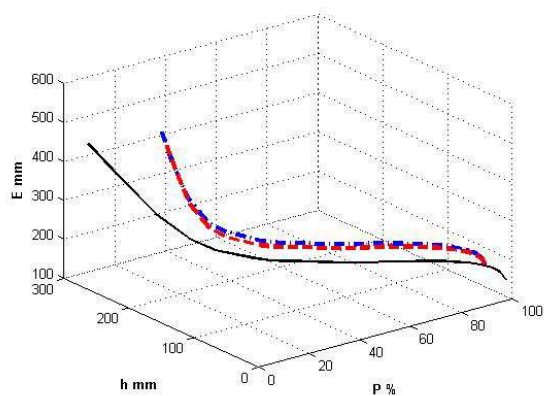
в)



г)



д)



жс)

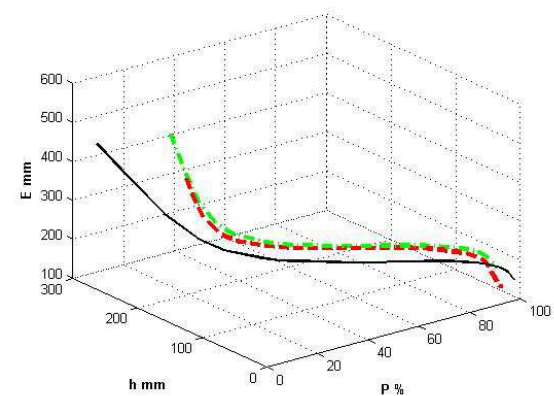
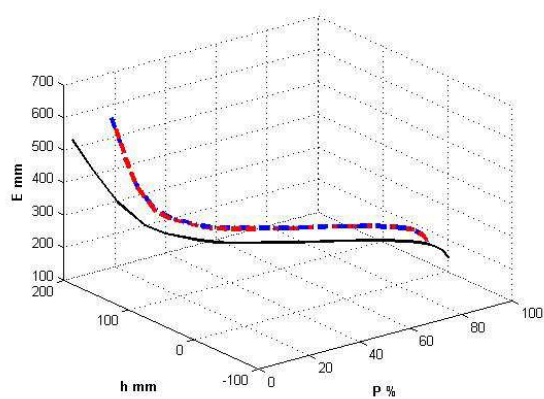
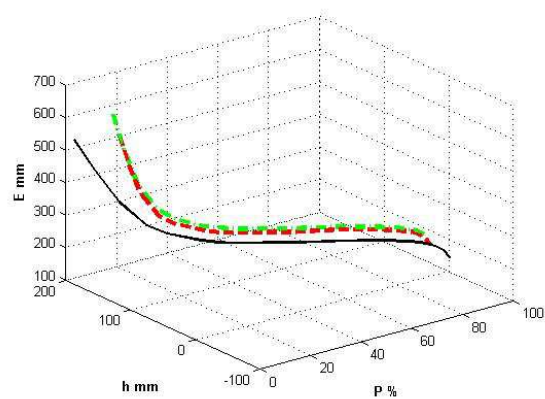


Рисунок Е.2 – Трехмерные кривые обеспеченности: а – *Mahneshan* (РТК 2,6), б – *Mahneshan* (РТК 8,5); в – (РТК 2,6), г – *MoterKhane* (РТК 8,5); д – *Ostor* (РТК 2,6), жс – *Ostor* (РТК 8,5).

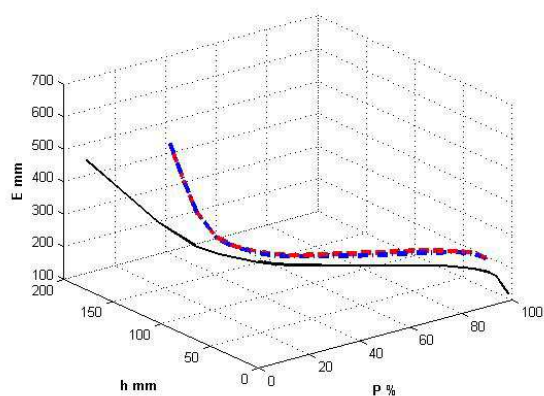
а)



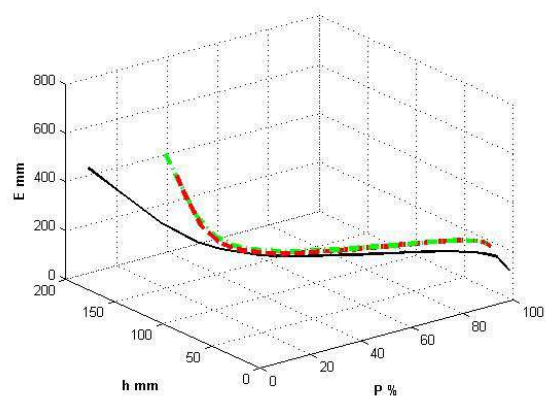
б)



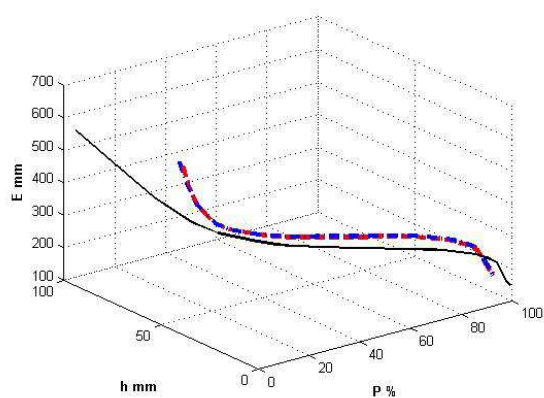
в)



г)



д)



жс)

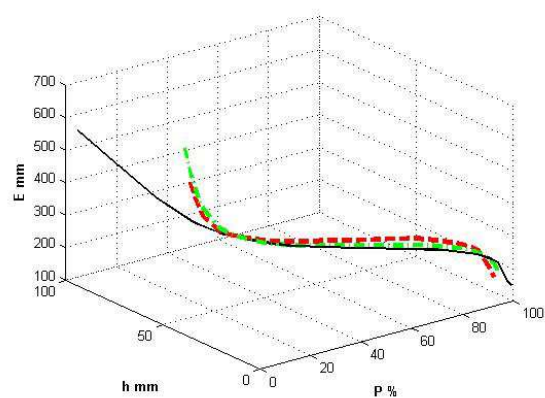
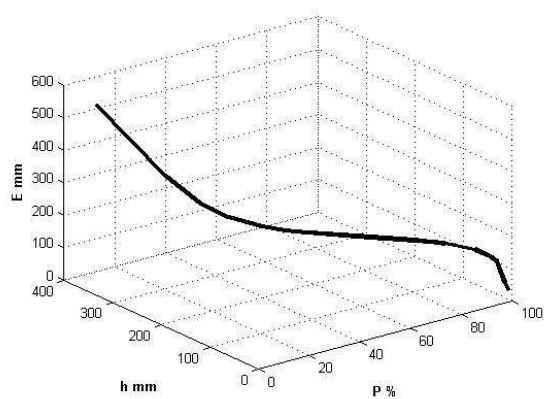
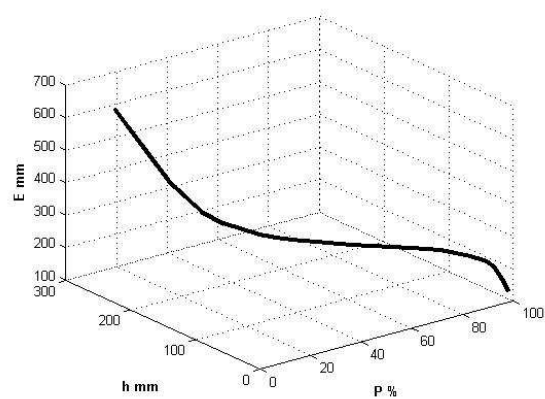


Рисунок Е.3 – Трехмерные кривые обеспеченности: а – Pole Dokhtar (PTK 2,6), б – Pole Dokhtar (PTK 8,5); в – SalamatAbad (PTK 2,6), г – Salamat Abad (PTK 8,5), д – Shadi Abad (PTK 2,6), жс – Shadi Abad (PTK 8,5).

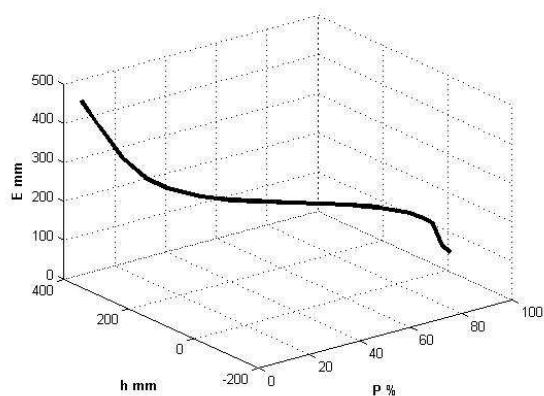
а)



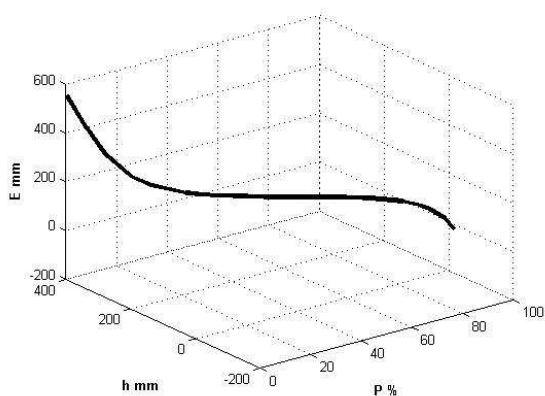
б)



в)



г)



д)

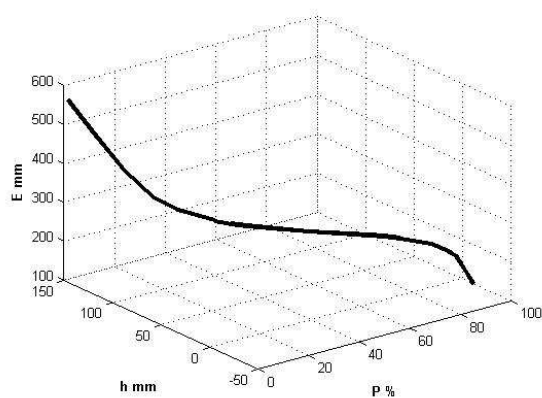
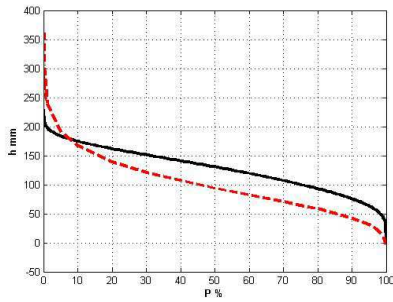
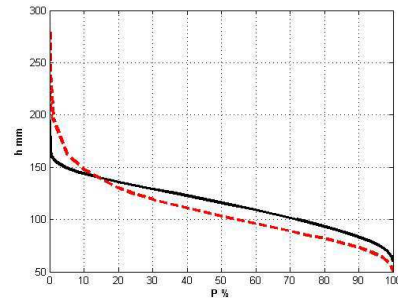


Рисунок Е.4— Трехмерные кривые обеспеченности: а – *HashtadJoft*, б – *IyankiKand*, в – *Myane (shahreChai)*, г – *Myane-Granko*, д – *Sarcham*.

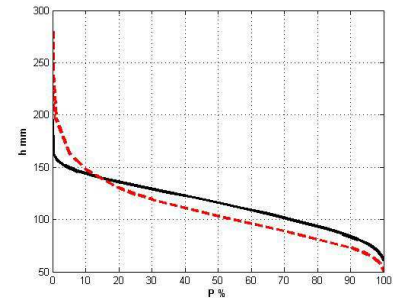
а)



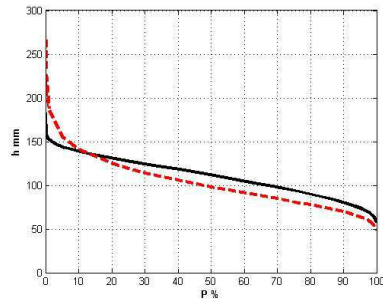
б)



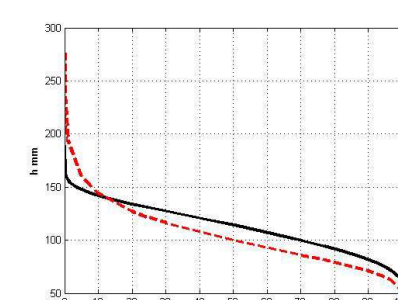
в)



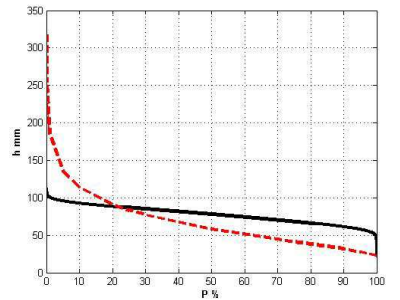
д)



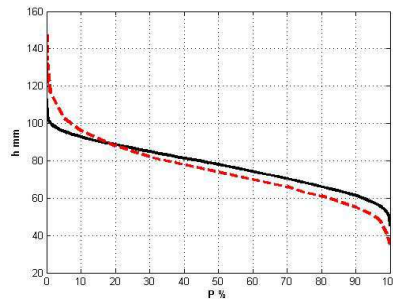
е)



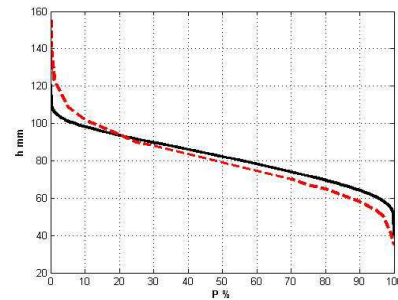
е)



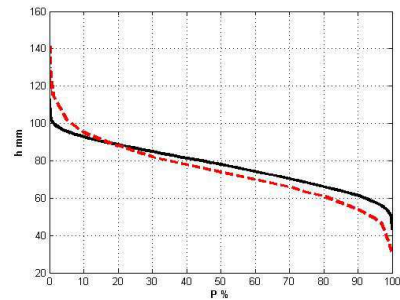
ж)



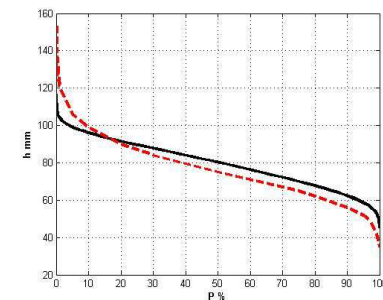
и)



к)



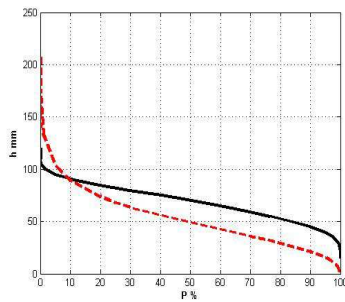
л)



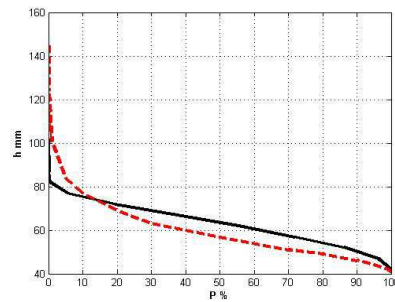
— условная кривая, --- аналитическая кривая

Рисунок Е.5 – Кривая обеспеченности. Пост *Binalud*: а – период с 1971 по 2000 гг., б – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), в – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), д – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), е – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5); пост *Gilave*: е – период с 1971 по 2000 гг., ж – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), и – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), к – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), л – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5).

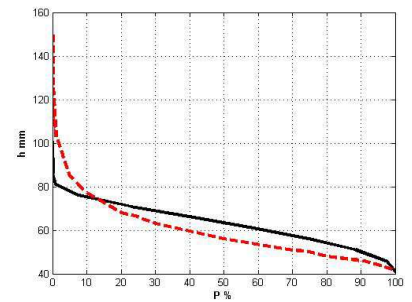
а)



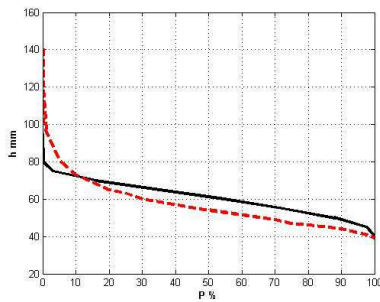
б)



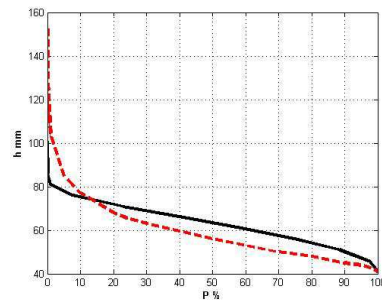
в)



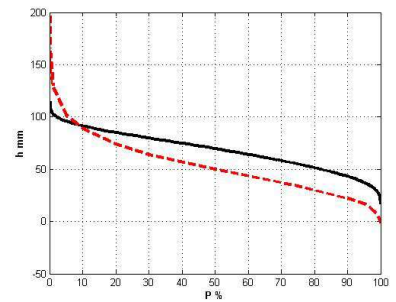
д)



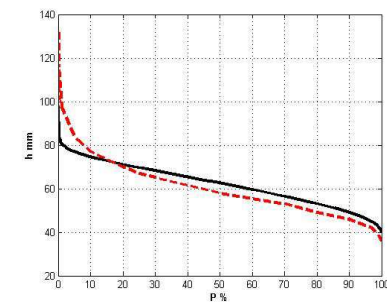
е)



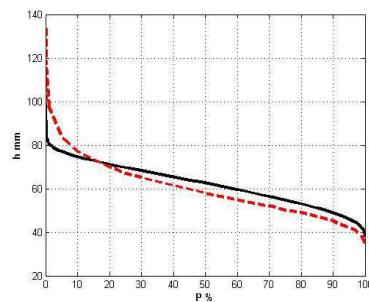
е)



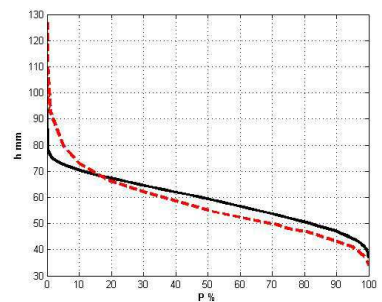
ж)



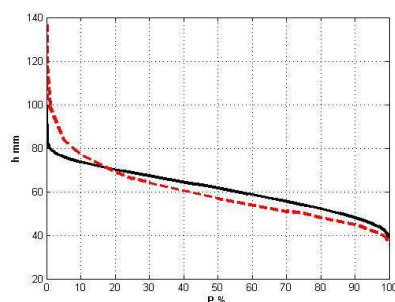
и)



к)



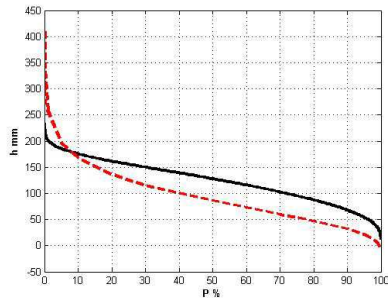
л)



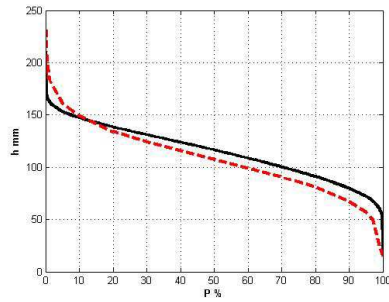
— условная кривая, --- аналитическая кривая

Рисунок Е.6 – Кривая обеспеченности. Пост *Gragoni*: а – период с 1971 по 2000 гг., б – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), в – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), д – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), е – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5); пост *Mahneshan*: е – период с 1971 по 2000 гг., ж – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), и – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), к – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), л – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5).

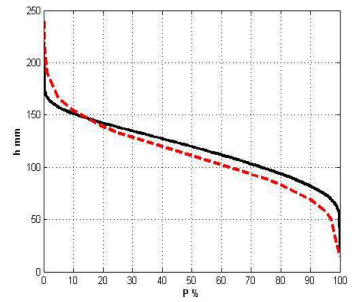
а)



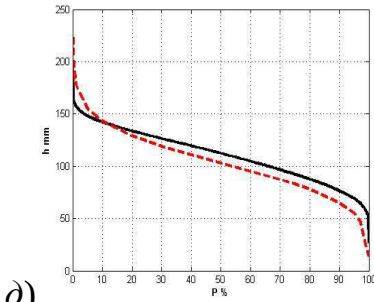
б)



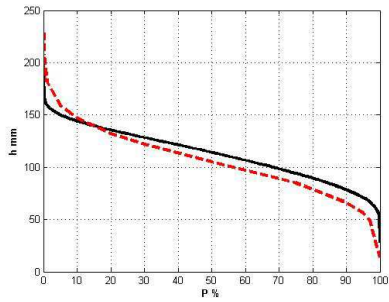
в)



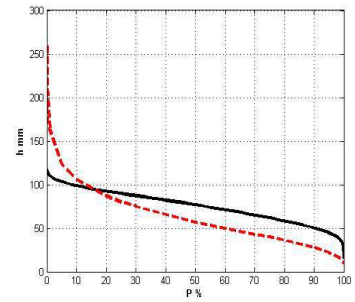
д)



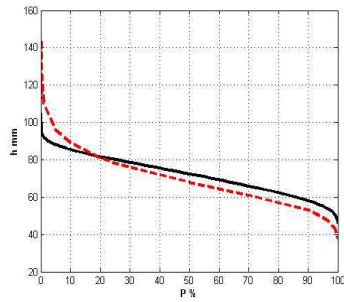
е)



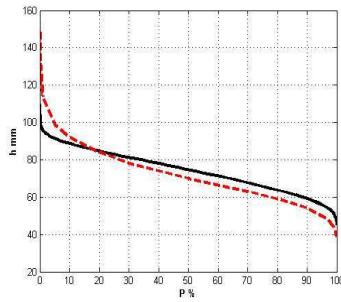
ж)



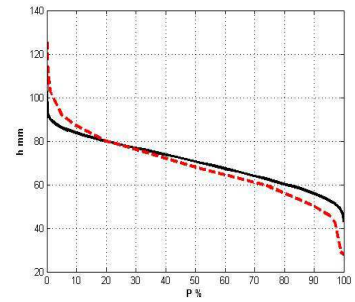
з)



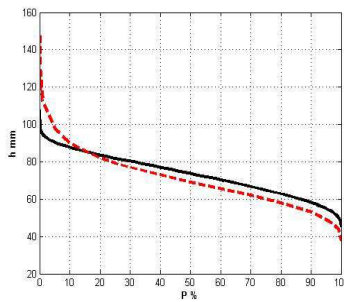
и)



к)



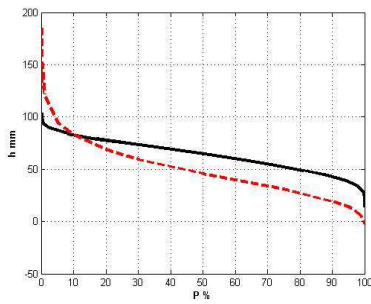
л)



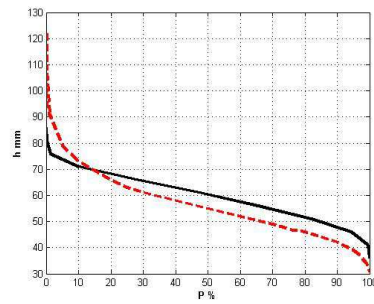
— условная кривая, --- аналитическая кривая

Рисунок Е.7 – Кривая обеспеченности. Пост *Motor Khane*: а – период с 1971 по 2000 гг., б – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), в – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), д – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), е – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5); пост *Ostor*: ж – период с 1971 по 2000 гг., з – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), и – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), к – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), л – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5).

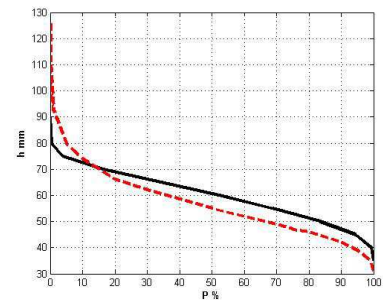
а)



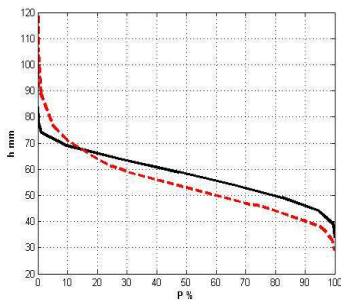
б)



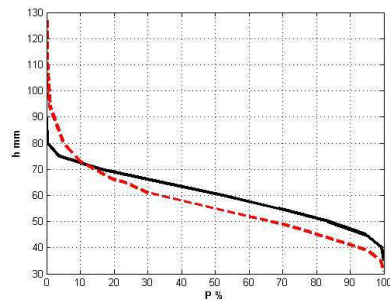
в)



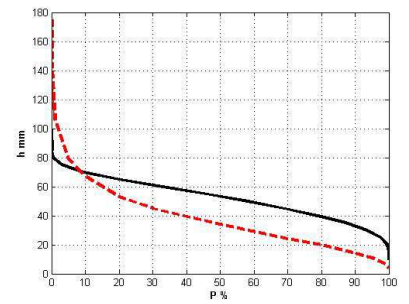
д)



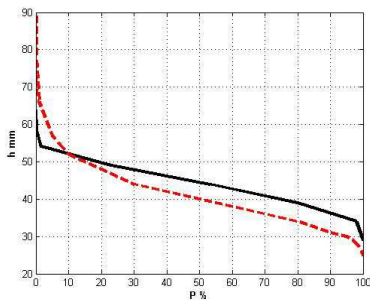
е)



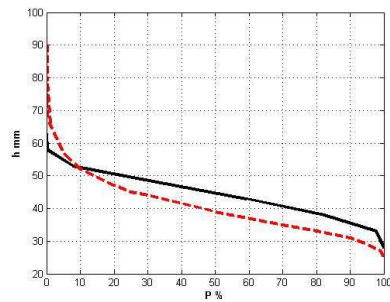
е)



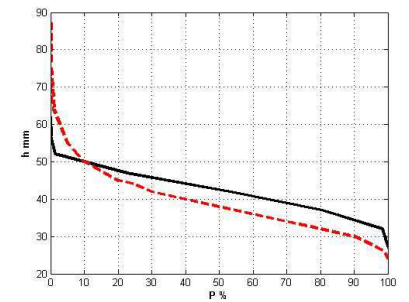
ж)



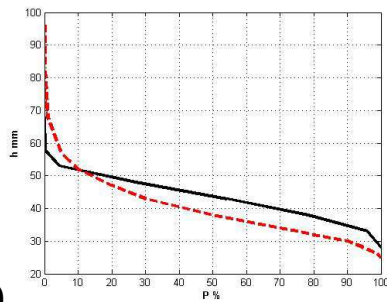
и)



к)



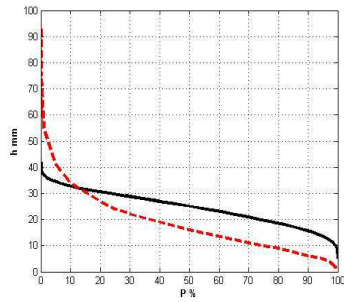
л)



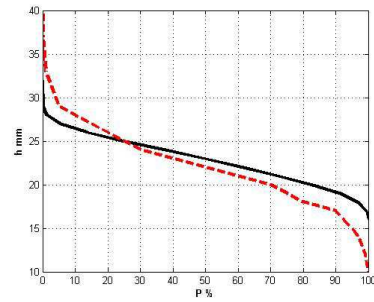
— условная кривая, --- аналитическая кривая

Рисунок Е.8 – Кривая обеспеченности. Пост *Pole Dokhtar:a* – период с 1971 по 2000 гг., б – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), в – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), д – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), е – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5); пост *SalamatAbad:e* – период с 1971 по 2000 гг., ж – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), и – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), к – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), л – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5).

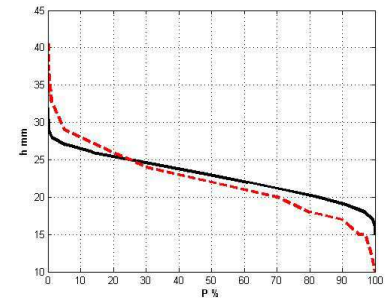
а)



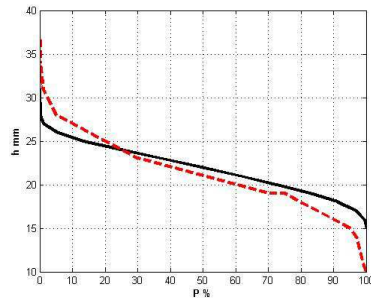
б)



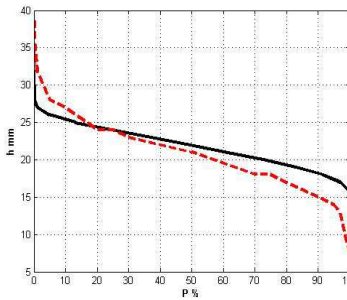
в)



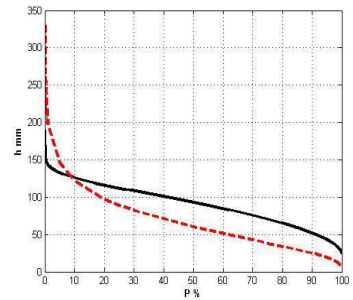
д)



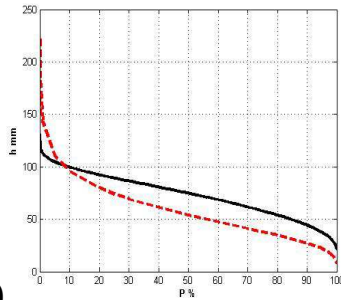
е)



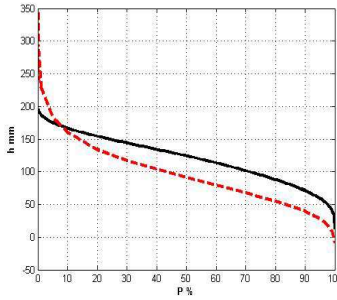
е)



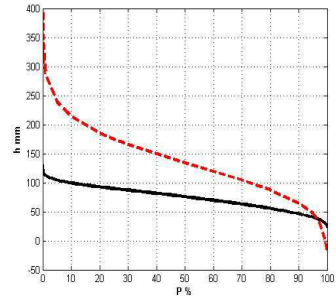
ж)



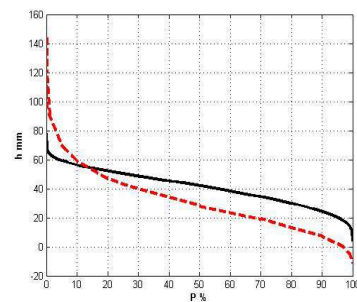
и)



к)



л)



— условная кривая, --- аналитическая кривая

Рисунок Е.9 – Кривая обеспеченности. Пост *Shadi Abad*: а – период с 1971 по 2000 гг., б – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 2,6), в – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 2,6), д – период с 2020 по 2049 гг. (РТК 8,5), е – период с 2050 по 2079 гг. (РТК 8,5); пост *Hashtad Joft n:e* – период с 1971 по 2000 гг., *Iyanki Kandж* – период с 1971 по 2000 гг., *Myane Share Chaiu* – период с 1971 по 2000 гг., *Myane-Grankok* – период с 1971 по 2000 гг. (РТК 8,5), *Sarchamл* – период с 1971 по 2000 гг.

Приложение Ж – Листинг программы по интерполяции данных климатических моделей

```

DimdiapAsString
DimYacheikaAsObject
Dimlat, lat1, lat2, longt, longt1, longt2 AsDouble
Dimi, N, j, kAsInteger
Dim diap1, diap2, diap3, diap4 As Double
Dim shirota1, shirota2 As Double
Dim dolgota1, dolgota2 As Double
Dim x, x1, y As Double
On Error GoTo Make
diap = UserForm1.RefEdit1.Value
N = Range(diap).Rows.Count
'Ïîââðåà ÷èñëà è
For Each Yacheika In Range(diap).Cells
If IsNumeric(Yacheika.Value) = False Then
MsgBox "Â ÿ÷åéàð äëåíü áóð ÷èñëà", vbInformation, "Ðàñ÷åò"
Exit Sub
End If
Next Yacheika
For i = 1 To N
lat = Range(diap).Cells(i, 1).Value
longt = Range(diap).Cells(i, 2).Value
lat1 = Fix(lat / 1)
longt1 = Fix(longt / 1)
If (lat1 > 0) And (longt1 > 0) Then
'MsgBox (lat1)
'MsgBox (longt1)
Sheets("pr").Activate
Cells(1, 2).Activate
shirota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=(90 + lat1) + 1, columnOffset:=0).Value
shirota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=(90 + lat1), columnOffset:=0).Value
'MsgBox (shirota2)
'MsgBox (shirota1)
For j = 0 To 205150
Sheets("pr").Activate
Cells(1, 2).Activate
dolgota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(longt1 - 1 + 2)).Value
dolgota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(longt1 - 1 + 1)).Value

```

```

'MsgBox (dolgota2)
'MsgBox (dolgota1)
Sheets("pr").Activate
Cells(1, 2).Activate
diap1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), columnOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1)).Value
diap2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), columnOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1 + 1)).Value
diap3 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), columnOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1)).Value
diap4 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), columnOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1 + 1)).Value
'MsgBox (diap1)
'MsgBox (diap2)
'MsgBox (diap3)
'MsgBox (diap4)
x = (diap1 - diap3) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap3
'MsgBox (x)
x1 = (diap2 - diap4) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap4
'MsgBox (x1)
y = x1 - (x1 - x) / 100 * (Abs(dolgota2 - longt) * 100)
'MsgBox (y)
Sheets("Dannie").Activate
Cells(2, 1).Activate
ActiveCell.Offset(rowOffset:=i, columnOffset:=j / 180 + 3).Value = y
j = j + 179
Next j
End If

```

```

If (lat1 < 0) And (longt1 > 0) Then
'MsgBox (lat1)
'MsgBox (longt1)
Sheets("pr").Activate
Cells(1, 2).Activate
shirota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((90 - (-1) * lat1) + 1), columnOffset:=0).Value
shirota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=(90 - (-1) * lat1), columnOffset:=0).Value
'MsgBox (shirota2)
'MsgBox (shirota1)
For j = 0 To 205150
Sheets("pr").Activate
Cells(1, 2).Activate

```

```

dolgota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(longt1 - 1 +
2)).Value
dolgota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(longt1 - 1 +
1)).Value
'MsgBox (dolgota2)
'MsgBox (dolgota1)
Sheets("pr").Activate
Cells(1, 2).Activate
diap1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), column-
nOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1)).Value
diap2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), column-
nOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1 + 1)).Value
diap3 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), column-
nOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1)).Value
diap4 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), column-
nOffset:=((-0.5 + Abs(dolgota2)) / 1 + 1)).Value
'MsgBox (diap1)
'MsgBox (diap2)
'MsgBox (diap3)
'MsgBox (diap4)
x = (diap1 - diap3) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap3
'MsgBox (x)
x1 = (diap2 - diap4) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap4
'MsgBox (x1)
y = x1 - (x1 - x) / 100 * (Abs(dolgota2 - longt) * 100)
'MsgBox (y)
Sheets("Dannie").Activate
Cells(2, 1).Activate
ActiveCell.Offset(rowOffset:=i, columnOffset:=j / 180 + 3).Value = y
j = j + 179
Next j
End If

```

```

If (lat1 < 0) And (longt1 < 0) Then
'MsgBox (lat1)
'MsgBox (longt1)
Sheets("pr").Activate
Cells(1, 2).Activate
shirota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((90 - (-1) * lat1) + 1), columnOff-
set:=0).Value
shirota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((90 - (-1) * lat1), columnOff-
set:=0).Value
'MsgBox (shirota2)
'MsgBox (shirota1)

```

```

For j = 0 To 205150
  Sheets("pr").Activate
  Cells(1, 2).Activate
  dolgota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(360 - (-1) * longt1
  - 1 + 2)).Value
  dolgota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(360 - (-1) * longt1
  - 1 + 1)).Value
  'MsgBox (dolgota2)
  'MsgBox (dolgota1)
  Sheets("pr").Activate
  Cells(1, 2).Activate
  diap1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), column-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1)).Value
  diap2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), column-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1 + 1)).Value
  diap3 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), column-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1)).Value
  diap4 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), column-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1 + 1)).Value
  'MsgBox (diap1)
  'MsgBox (diap2)
  'MsgBox (diap3)
  'MsgBox (diap4)
  x = (diap1 - diap3) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap3
  'MsgBox (x)
  x1 = (diap2 - diap4) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap4
  'MsgBox (x1)
  y = x1 - (x1 - x) / 100 * (Abs(dolgota2 - longt) * 100)
  'MsgBox (y)
  Sheets("Dannie").Activate
  Cells(2, 1).Activate
  ActiveCell.Offset(rowOffset:=i, columnOffset:=j / 180 + 3).Value = y
  j = j + 179
Next j
End If

If (lat1 > 0) And (longt1 < 0) Then
  'MsgBox (lat1)
  'MsgBox (longt1)
  Sheets("pr").Activate
  Cells(1, 2).Activate
  shirota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((90 + lat1) + 1), columnOff-
  set:=0).Value
  shirota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=(90 + lat1), columnOffset:=0).Value

```

```

'MsgBox (shirota2)
'MsgBox (shirota1)
For j = 0 To 205150
  Sheets("pr").Activate
  Cells(1, 2).Activate
  dolgota1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(360 - (-1) * longt1
  - 1 + 2)).Value
  dolgota2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=0, columnOffset:=(360 - (-1) * longt1
  - 1 + 1)).Value
  'MsgBox (dolgota2)
  'MsgBox (dolgota1)
  Sheets("pr").Activate
  Cells(1, 2).Activate
  diap1 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), colum-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1)).Value
  diap2 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 1 + j), colum-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1 + 1)).Value
  diap3 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), colum-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1)).Value
  diap4 = ActiveCell.Offset(rowOffset:=((89.5 + shirota1) / 1 + 2 + j), colum-
  nOffset:=((Abs(360 - (-1) * longt1)) / 1 + 1)).Value
  'MsgBox (diap1)
  'MsgBox (diap2)
  'MsgBox (diap3)
  'MsgBox (diap4)
  x = (diap1 - diap3) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap3
  'MsgBox (x)
  x1 = (diap2 - diap4) / 100 * ((Abs(lat - shirota2)) * 100) + diap4
  'MsgBox (x1)
  y = x1 - (x1 - x) / 100 * (Abs(dolgota2 - longt) * 100)
  'MsgBox (y)
  Sheets("Dannie").Activate
  Cells(2, 1).Activate
  ActiveCell.Offset(rowOffset:=i, columnOffset:=j / 180 + 3).Value = y
  j = j + 179
Next j
End If

Next i
Make:
Select Case Err.Number
Case Is = 6
MsgBox "İđîèçîøëà îøëâêà îăđăîîëîăîëÿ", vbInformation, "Đàñ÷ăò"
Exit Sub

```

Case Is = 1004

MsgBox "İđîâăđü ıđââèëüíîñòü ââîââ äàííûõ", vbInformation, "Đàñ÷ăò"

Exit Sub

End Select

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

UserForm1.Hide

End Sub

Private Sub UserForm_Click()

End Sub

Sub Macros1()

UserForm1.Show

End Sub

Приложение 3 – Листинг программы визуализации взаимодействия двух фазовых переменных

```

% ряды по стоку Q
% и ряды по испарению E
b=corrcoef(Q,E);
% коэффициенткорреляции
rQE=b(2,1);
% СКО стока и испарения
SQ=std(Q);
SE=std(E);
% Q1 и E1 средние значения
Q1=mean(Q);
E1=mean(E);
minQ = min(Q);
minE = min(E);
maxQ=max(Q);
maxE=max(E);

[X, Y] = meshgrid(minQ:10:maxQ, minE:10:maxE);
a=(-1/(2*(1-(rQE^2))).*(((X-Q1).^2)/(SQ^2))- ((2*rQE).*(X-Q1).*(Y-
E1))./(SQ*SE)+((Y-E1).^2)/(SE^2)));
h=(2*pi*SQ*SE);
m=(2.7183);
t=(rQE^2);
p=1./(h.*(1-t).^0.5)).*(m.^((a).^2)));
mesh(X,Y,p);
xlabel('h', 'FontAngle','i');
ylabel('E', 'FontAngle','i');

```

```

xlabel('p', 'FontAngle','i');
a1=(-1/(2*(1-(rQE^2))).*(((Q-Q1).^2)./(SQ^2))- ((2*rQE).*(Q-Q1).*(E-
E1))./(SQ*SE)+((E-E1).^2)./(SE^2)));
h1=(2*pi*SQ*SE);
m1=(2.7183);
t1=(rQE^2);
p1=1./(h1.*(1-t1).^0.5)).*(m1.^((a1).^2)));
hold on;
plot3(Q, E, p1, 'xk');

```

```

% рисуем эллипс рассеивания

```

```

figure;
plot(Q, E, 'ob');
grid on;
xlabel('h', 'FontAngle','i');
ylabel('E', 'FontAngle','i');

```

```

% рисуем гистограмму

```

```

figure;
dat = [Q, E];
hist3 (dat, [5 5], 'FaceAlpha', 0.50);
grid on;
xlabel('h', 'FontAngle','i');
ylabel('E', 'FontAngle','i');
zlabel('n', 'FontAngle','i');
set(gcf, 'renderer', 'opengl');

```

Приложение И – Листинг программы по визуализации прогнозных поверхностей вероятности

```

rQE=0.5

SQ=80
SE=60
% Q1 è E1 ñ
Q1=170
E1=150
minQ = 0
minE = 0
maxQ=500
maxE=500
[X, Y] = meshgrid(minQ:10:maxQ, E1:0.1:(E1+0.1));
a=(-1/(2*(1-(rQE^2))).*(((X-Q1).^2)/(SQ^2))- ((2*rQE).*(X-Q1).*(Y-
E1))./(SQ*SE)+((Y-E1).^2)/(SE^2)));
h=(2*pi*SQ*SE);
m=(2.7183);
t=(rQE^2);
p=1./(h.*(1-t).^0.5)).*(m.^((a).^2)) [p=1./(h.*(1-(t.^0.5)).*(m.^((a).^2)))]
mesh(X,Y,p);
xlabel('h', 'FontAngle','i');
ylabel('E', 'FontAngle','i');
zlabel('p', 'FontAngle','i');

```