

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Санкт-Петербург  
2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

**Научный руководитель:** Бурлов Вячеслав Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности Российского государственного гидрометеорологического университета

**Научный консультант:** Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерная гидрология Российского государственного гидрометеорологического университета

**Официальные оппоненты:** Кляхин Валерий Николаевич, доктор военных наук, профессор, старший научный сотрудник НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»

Лавров Сергей Алексеевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Государственного гидрологического института

**Ведущая организация:** Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г. в \_\_\_\_ на заседании Диссертационного совета Д212.197.03 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Металлистов, 3.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах просим направлять по адресу: 192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79, диссертационный совет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.197.03, к.в.н., доцент



Соколов А.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Проблема нехватки воды для Ирана, в силу его расположения в зоне с сухим и полусухим климатом, всегда являлась чрезвычайно актуальной. Более 80 % территории Ирана находится в областях Земли, где преобладают типы климата с малым количеством осадков или полным их отсутствием. На сегодняшний день эта проблема может быть решена только благодаря обоснованному управлению водными ресурсами, что может быть обеспечено при помощи использования геоинформационных систем. Таким образом, наравне с повышенными требованиями, предъявляемыми к водохозяйственной деятельности, возникает актуальная задача формирования баз данных и баз знаний геоинформационной системы управления водными ресурсами на территории Ирана, что, в свою очередь, включает в себя сбор и систематизацию данных о долгосрочных вероятностных характеристиках многолетнего речного стока, в первую очередь – годового, который является индикатором обеспеченности водопотребления водных ресурсов.

Особое значение в условиях Ирана является управление водопользованием – формирование спроса на воду. О важности такой деятельности для руководства Ирана сообщает, например, ИА «*Fars News*» 25.01.2019. Технология такого управления сводится к преобразованию информационных и деятельностных ресурсов в интересах достижения цели деятельности. Управление водопользованием 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 средства и информационное обеспечение. Поэтому особый научный и практический интерес представляет формирование геоинформационной системы управления водопользованием и предъявляемым к ней требованиям. На основе данных прогнозирования среднегодового стока рек Ирана был произведен анализ и систематизация пространственно-координированных данных, а также их отображение на картографической подложке в целях обеспечения информацией, контроля и поддержки принятия управленческих решений в сферах планирования и проектирования, сохранении экологического равновесия, предупреждения чрезвычайных ситуаций и водоснабжения страны. Для задач такого класса в

РГГМУ разработана методология, которая успешно применяется для различных видов речного стока России. Поэтому важный научный и практический интерес представляет применение этого метода для решения задач управления водопользованием в условиях Ирана.

Таким образом, решение данной актуальной задачи осуществляется на основе комплексного подхода, включающего в себя принципы построения и функционирования ГИС на основе сбора, обработки и систематизации пространственно-координированных данных, полученных в ходе разработки и практического применения многомерных распределений, которые описывают процесс формирования многолетнего речного стока.

Тема настоящего исследования соответствует паспорту специальности «Геоинформатика», так как разработка современных систем управления водопользованием основана на пространственных географических данных, к которым относятся спрогнозированные характеристики речного стока, испарения и суммарных влагозапасов.

В общем случае исследования должны базироваться на трехмерных распределениях  $p(Q, E, \Delta U)$ , так как уравнение годового баланса речного бассейна содержит сток, испарение и изменение суммарных влагозапасов. Такие модели необходимы для получения устойчивых кривых обеспеченности в интересах проектной практики.

**Цели и задачи исследования.** Целью настоящей диссертации является разработка и адаптация к условиям Ирана методик информационного обеспечения геоинформационной системы прогнозирования среднегодового стока рек.

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 кривых условных плотностей 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 распределения стока с целью оценки устойчивости решений прогностического уравнения в качестве реализации решения интеллектуально-го 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 кривых условных плотностей вероятности с целью обоснования требований к формированию интеллектуальной поддержки принятия решения;

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

### **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 к 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.

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 метеоэлементами (Христофоров А. В.).

На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ разработана методология вероятностного прогнозирования гидрологических по-

следствий 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 диссертационном исследовании, так как она адаптирована для инженерных расчетов, включает расчетные выражения, дающие устойчивые решения, и использует общедоступные гидрометеорологические исходные данные.

**Научная новизна** заключается в:

– создании объединенной синхронизированной (впервые) базы 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 для Ирана построены совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения (для условных и безусловных распределений) для условий текущего климата и для ряда климатических сценариев: *RCP 2.6*, *RCP 8.5*, модели *MPI-ESM-MR*, *CESM1(CAM5)* и *BCC-CSM1(1M)*.

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

**Теоретическая значимость** определяется:

– результатами исследования, которые позволяют 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 построения 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;

– возможностью использования 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. Эта школа использует естественно-научный подход, базирующийся на законе сохранения целостности объекта.

Реализация вычислений осуществлялась на персональном компьютере с использованием среды разработки *Visual Basic*, *MatLab* и приложения 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.**

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

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

3. Методика текущей и сценарной оценки обеспеченности стока речных бассейнов рек Ирана на основе построения совместных одномерных многообразий стока и испарения.

4. 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 международных и российских 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* Между-



народная 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» (№ госрегистрации 01 2014 58678). Результаты исследования внедрены в учебный процесс РГГМУ по специальности 05.04.05 – Прикладная гидрометеорология (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.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и 9 приложений. Работа изложена на 261 странице и включает 48 рисунков и 18 таблиц. Список использованных источников состоит из 143 источников российских и зарубежных авторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, рассматриваются научная новизна и практическая значимость исследования, перечисляются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** описывается актуальность разрабатываемой темы, существующие прототипы, ставятся цели, задачи исследования, а также создается информационная база с целью формирования картографической составляющей статистической модели обстановки геоинформационной системы 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 графические объекты, являющиеся элементами электронных карт расчетных гидрологических характеристик: нормы стока  $h$ , коэффициентов вариации  $C_v$  и асимметрии  $C_s$ , а также ко-

эффицентов стока  $k$  и автокорреляции  $r(1)$  при годовой сдвигке. Последние коэффициенты ( $k$  и  $r(1)$ ) необходимы также для оценки степени устойчивости решений математической модели, служащей для описания процесса формирования многолетнего речного стока.

Обработка рядов стока проводилась в соответствии с теми рекомендациями, которые используются в России: построение разностно-интегральных кривых, применение критериев Стьюдента и Фишера для оценки степени однородности. Статистически обрабатывались только ряды наблюдения за расходом воды зональных рек. Для определения критической площади, отделяющей азональные бассейны от зональных, была построена редуцирующая зависимость, позволившая найти репрезентативную площадь – 1700 км<sup>2</sup>. Условиям зональности отвечают 28 бассейна из 56.

Представление о рядах и рассчитанных статистических характеристиках дает табл. П.1. 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 табл. П.1, сформированы картографические наборы с целью отображения графического образа, которые показаны на рис. П.1.

Рис. П.2 показывает, что на значительной территории бассейна р. Сефидруда годовой сток моделируется неустойчиво для третьего и второго начального момента (а значит, по коэффициентам асимметрии и вариации), но в бассейне р. Карун 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 в сведении водного баланса речных бассейнов Ирана. При использовании только статистических характеристик стока могут возникнуть проблемы и с правильной аппроксимацией эмпирических распределений стока кривыми из класса семейств распределений Пирсона; ситуация может ухудшиться при прогнозной оценке гидрологического режима по определенным климатическим сценариям.

В связи с возможным получением неустойчивых решений при моделировании стока необходимо использовать ряды испарения для учета его характеристик при прогнозе.

Существуют различные методы для оценки значения испарения, в том числе и эмпирические формулы. Были проанализированы методы, которые распространены в Иране и России, отличающиеся набо-

ром входящих в них величин. Практически все методы в своей основе содержат уравнение водного баланса. Это уравнение и было использовано для вычисления значений испарения с замкнутых речных водосборов Иранского плоскогорья, для которых величина годового изменения суммарных влагозапасов близка к нулю. В табл. П.2 представлены вычисленные значения испарения. Сгенерированные ряды испарения оценены на однородность по дисперсии и среднему значению; по среднему значению все ряды однородны на 5 % уровне значимости. Рассчитанные величины испарения были закартированы.

**Во второй главе** рассматривается методика оценки долгосрочных изменений годового стока, которая базируется на системе дифференциальных уравнений для начальных моментов, которая аппроксимирует уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова.

Для оценки гидрологических последствий изменения климата для рек Карун и Сефидруд использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{N} &= 0, \\ -2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

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

Перед использованием системы уравнений для сценарной оценки вероятностных распределений многолетнего годового стока Ирана была проведена ее проверка на ретроспективном материале.

Апробация прогнозной модели на ретроспективном материале показала ее пригодность (оправдываемость составила 69 %) для условий Ирана, следовательно, можно перейти к выполнению сценарной оценки расчетных гидрологических характеристик по экстремальным климатическим сценариям РТК 2.6 и РТК 8.5 по климатическим моделям *MPI-ESM-MR*, *CESM1(CAM5)* и *BCC-CSM1(IM)* Пятого доклада МГЭИК. Для получения более надежных прогнозов была произведена адаптация (увеличение разрешения) модели к условиям Ирана методом *change factor* (Дельта-метод).

**В третьей главе** по методике, изложенной в главе 2, были сделаны долгосрочные прогнозы вероятностных характеристик рек Карун и Сефидруд по климатическим моделям. Сценарная оценка дана на периоды с 2020 по 2049 гг. (первый период) и с 2050 по 2079 гг.

Для каждого прогнозируемого сценария проведено сравнение прогнозных картографических наборов с фактическими, и выделены зоны, в которых имеются статистически значимые отклонения, т. е. такие, которые превышают погрешность расчетной характеристики: для нормы стока – 15 % для коэффициента вариации – 20 %. Информация о сценарных обеспеченных характеристиках представлена в табл. П.3.

Наибольшие отклонения прогнозных значений нормы слоя стока от фактических характерны для малых обеспеченностей. Получено, что изменение климата следует учитывать при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений, относящихся к I и II классу капитальности по классификации видов производственной эффективности, значению сооружения и сроку службы.

Для испарения отклонения не превосходят 15 %. Этот результат возможен при прогнозе незначительных изменений норм температуры приземного воздуха по рассматриваемым климатическим сценариям.

В **четвертой главе** приведено теоретическое обоснование и построение двумерных плотностей вероятностей  $p(Q, E)$ .

Были получены результаты, указывающие на то, что 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. Неустойчивость указывает на то, что сток (или испарение) формируется более сложно, чем это следует из уравнения Пирсона, например, если имеет место их взаимодействие. Учет последнего фактора требует перехода к двумерным распределениям.

В РГГМУ была разработана методология частично инфинитного моделирования, которая включает в себя процедуру включения в модель формирования стока новых переменных (в нашем случае испарения), которые уменьшают мультипликативную составляющую шумов. Вместо одномерного уравнения применяется  $n$ -мерное. В этом случае устойчивость моментов повышается.

Обоснование усложнения модели формирования многолетнего стока Ирана подтверждается наличием речных бассейнов зон неустойчивости по статистическим моментам в настоящих и будущих климатических условиях. Таким образом, имеются предпосылки для перехода к двумерному распределению плотности вероятности  $p(Q, E)$ .

По имеющимся совместным рядам слоя стока и испарения строились эллипсы рассеивания, эмпирические двумерные гистограммы и теоретические поверхности плотности вероятности (рис. 1), а также

совместные распределения, базирующиеся на использовании, так называемых, одномерных многообразий кривых обеспеченности, построенных в координатах обеспеченность–сток–испарение (рис. 2). На рис. 2 показаны также прогнозные совместные кривые стока и испарения.

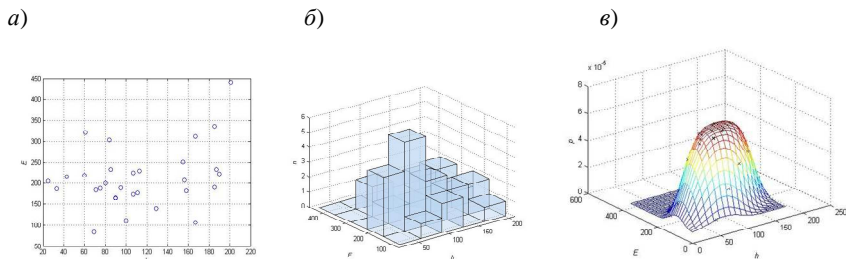


Рис. 1. Пост *Binalud*: *a* – эллипс рассеивания, *б* – гистограмма годовых значений испарения и слоя стока, *в* – трехмерная плотность вероятности.

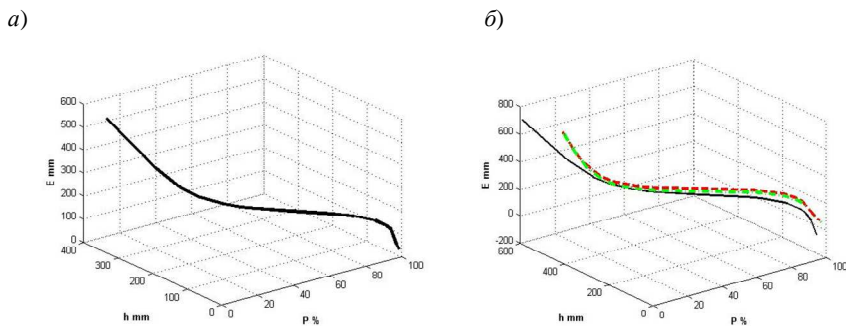


Рис. 2. Трехмерные кривые обеспеченности: *a* – *Hashtad Joft* (фактическая), *б* – *Rahim Abad* (прогнозные).

Наличие эмпирических двумерных гистограмм создает возможности для разработки различных двумерных вариантов уравнения и способов их решения. В частности, для случайных установившихся процессов предложен двумерный аналог уравнения Пирсона для  $p(Q, E)$ . Оно представляет собой уравнение в частных производных первого порядка, а его решением методом характеристик служит двумерная поверхность в трехмерном пространстве  $p(Q, E)$ .

Решение одной из задач диссертации подразумевает обоснование варианта по использованию двумерных распределений плотности вероятности  $p(Q, E)$  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  $p(Q, E)$ .

В данном исследовании предлагается получение условных кривых из теоретических поверхностей плотности вероятности, а не из эмпирических графиков, как делалось ранее.

Математическое выражение для построения двумерной поверхности плотности вероятности имеет вид

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

где

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

$\sigma_Q$  – среднееквадратическое отклонение по ряду стока,  $\sigma_E$  – среднееквадратическое отклонение по ряду испарения,  $r_{QE}$  – коэффициент корреляции между рядами стока и испарения,  $\bar{Q}$  и  $\bar{E}$  – среднее значения стока и испарения,  $Q$  и  $E$  – значения стока и испарения в каждом узле расчетной сетки.

Алгоритм получения условных кривых обеспеченности показан на рис. 3. «Колокольчик» двумерной плотности вероятности как бы «разрезается» по норме испарения, и вид спереди по оси испарения представляет собой уже условную (т. е. при условии, что значение испарения равно его норме) кривую плотности вероятности. Алгоритм был запрограммирован в компьютерном приложении *MatLab*.

Для долгосрочного прогноза (сценарной оценки) значений плотности вероятности по уравнению (2) необходимо знание сценарных значений  $\sigma_Q$ ,  $\sigma_E$ ,  $r_{QE}$ ,  $\bar{Q}$  и  $\bar{E}$ . Практически все эти характеристики, кроме коэффициента корреляции между рядами стока и испарения  $r_{QE}$ , можно получить по методике, основанной на системе алгебраических уравнений для начальных статистических моментов (1).

Были получены фактические и сценарные теоретические поверхности плотности вероятности и условные кривые обеспеченности. Пример поверхностей и кривых представлен на рис. П.3.

Получено, что проэкстраполированный в зону малых обеспеченностей «хвост» условного распределения быстрее приближается к оси стока, чем безусловный. Теоретическое представление двумер-

ной плотности вероятности позволило оптимизировать процесс нахождения фактических и сценарных условных обеспеченных значений расходов воды, необходимых для надежного моделирования (прогнозирования) процесса формирования речного стока.

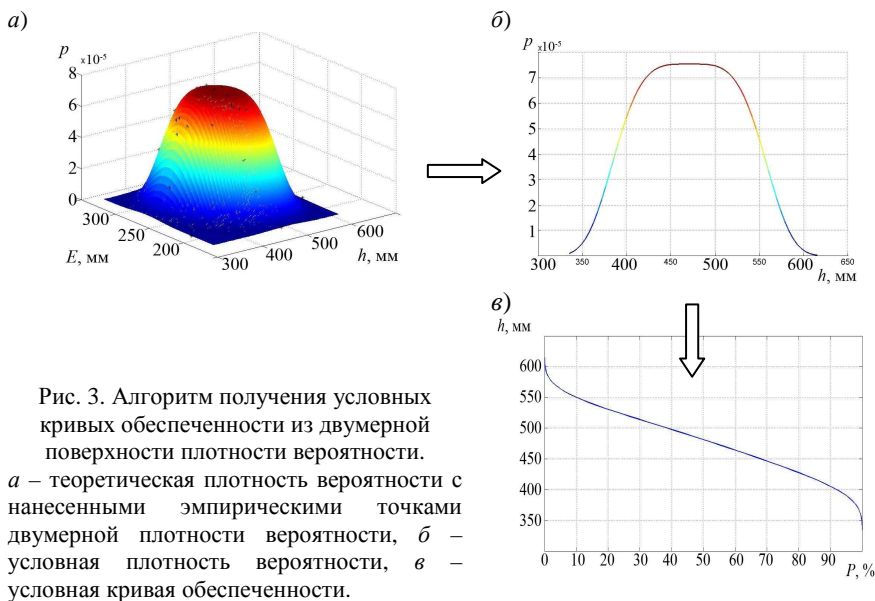


Рис. 3. Алгоритм получения условных кривых обеспеченности из двумерной поверхности плотности вероятности.

*а* – теоретическая плотность вероятности с нанесенными эмпирическими точками двумерной плотности вероятности, *б* – условная плотность вероятности, *в* – условная кривая обеспеченности.

В пятой главе разработан метод обоснования требований к прогнозированию характеристик информационного обеспечения ГИС. Показано, что ГИС УВП основана как на зондировании водохозяйственной системы, опирающейся на сеть наземных наблюдений, так и на результаты прогнозирования характеристик показателей речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов. Обосновано, что данные показатели являются основными конструктивными элементами формирования информационного обеспечения системы УВП. Интеграция системы управления водопользованием и ГИС привело к созданию геоинформационной системы управления водопользованием (ГИС УВП), деятельность которого должна обеспечивать гарантированный результат.

Осуществлена интеграция процессов прогнозирования характеристик геоданных и формирования решения на водопользование. Получено условие существования процесса УВП и как следствие – разработана конструктивная технология. Для этого используется естественно-научный подход (ЕНП) к управлению водопользованием. ЕНП

определяется интеграцией свойств Мышления человека, окружающего Мира и Познания, реализуется научно-педагогической школой «Системная интеграция процессов государственного управления». Интеграция осуществлена в форме соотношения:

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

Характеристики  $T_{\text{э}}$ ,  $\Delta t_{\text{пр}}$ ,  $\Delta t_{\text{ин}}$ ,  $\Delta t_{\text{нп}}$  удовлетворяют свойствам марковских процессов. Это позволило использовать систему дифференциальных уравнений Колмогорова–Чепмена и установить причинно-следственные связи настоящего исследования. Для этого осуществлен переход от абсолютных значений интервалов времени к интенсивностям следующего вида:  $\zeta^+ = 1/T_{\text{э}}$ ,  $\lambda = 1/\Delta t_{\text{пр}}$ ,  $\nu_1 = 1/\Delta t_{\text{ин}}$ ,  $\nu_2 = 1/\Delta t_{\text{нп}}$ , где  $T_{\text{э}} = f_0(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_e)$  описывает процесс прогнозирования;  $\Delta t_{\text{пр}} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – описывает процесс образования проблемы;  $\Delta t_{\text{ин}} = f_2(y_1, y_2, \dots, y_m)$  – описывает процесс идентификации проблемы;  $\Delta t_{\text{нп}} = f_3(z_1, z_2, \dots, z_k)$  – описывает процесс нейтрализации проблемы.

Функции  $f_0(\dots)$ ,  $f_1(\dots)$ ,  $f_2(\dots)$ ,  $f_3(\dots)$  описывают действия (работы) и временные затраты, которые надо осуществить при достижении соответствующих состояний  $(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_e)$ ,  $(x_1, \dots, x_n)$ ,  $(y_1, \dots, y_m)$ ,  $(z_1, \dots, z_k)$ .

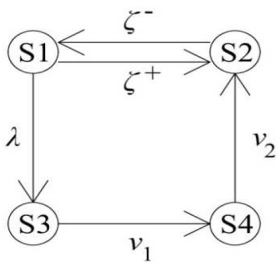


Рис. 4. Граф процесса функционирования ГИС УВП.

Распознавание и нейтрализация строятся на основе использования характеристик геоданных. Разработана графовая модель ГИС УВП (рис. 4). Показателем эффективности функционирования в этом случае является вероятность того, что каждая проблема (задача), возникающая в ГИС УВП, идентифицируется и нейтрализуется при условии требуемой реализации процесса прогнозирования характеристик геоданных (показателей речного стока, испарения и изменения суммарных влагозапасов).

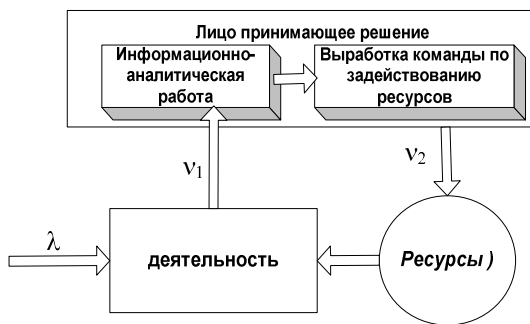
ГИС УВП может находиться в четырех состояниях: S1 – штатная начальная ситуация функционирования ГИС УВП, S2 – ситуация функционирования ГИС УВП, в которой она находится в результате реализации управляющего воздействия, выработанного ГИС УВП на основе идентификации проблемы и ее нейтрализации. Для перевода системы из состояния S1 в состояние S2 требуется время  $T_{\text{э}}$  – среднее время реализации прогнозирования характеристик геоданных для конкретной задачи, возникшей в контуре ГИС УВП. Для определе-



ния пригодности алгоритмического обеспечения прогнозирования характеристик геоданных для ГИС управлении водопользованием введен показатель частоты срыва процесса прогнозирования –  $\zeta^-$ , т. е., насколько часто результаты прогнозирования характеристик геоданных не соответствуют требованиям процесса УВП. S3 – состояние проявления проблемы в контуре системы УВП, S4 – состояние идентификации проблемы, которую надо решить системой УВП.

Рис. 5. Структурная схема управления водопользования:

$\lambda$  – величина, обратная среднему времени проявления проблемы;  $v_1$  – величина, обратная среднему времени идентификации проблемы;  $v_2$  – величина, обратная среднему времени нейтрализации проблемы.



При решении практических задач управления водопользованием основным элементом является состояние, соответствующее достижению цели.

Выявление механизмов связи элементов модели с показателем эффективности функционирования ГИС УВП позволяет сформулировать метод обоснования требований к прогнозированию характеристик геоданных (рис. 5).

По результатам работы сделаны **выводы**:

1. Создана база данных с синхронными рядами гидрометеорологических характеристик для речных бассейнов Ирана.

2. Синхронные совместные ряды стока и испарения были статистически обработаны, в результате чего удалось сформировать базу данных необходимых для получения двумерных вероятностных распределений стока.

3. Построены двумерные распределения плотности вероятности  $p(Q, E)$ , с использованием которых получены безусловные и условные распределения  $p(Q)$ .

4. Установлено, что с уменьшением обеспеченности расходов воды расхождение хвостов условных и безусловных кривых вероятностных распределений увеличивается.

5. Выявлены бассейны статистически значимых отклонений прогнозных характеристик стока от фактических.

6. Разработана методика прогноза кривых условных плотностей вероятностей.

7. Разработан метод обоснования требований к формированию геоданных для информационного обеспечения ГИС управления водопользованием.

### **Список публикаций по теме диссертации:**

В журналах, входящих в список ВАК:

1. О возможности учета испарения при моделировании процесса формирования многолетнего речного стока (на примере Западной Африки) // Ученые записки РГГМУ, № 44, 2016. – С. 45–53 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Соловьевым Ф.Л., Бонгу С.Э.).

2. Гидрологические характеристики многолетнего годового стока рек Сефидруд и Карун (Иран) // Ученые записки РГГМУ, № 46, 2017. – С. 21–28 (в соавторстве с Гайдуковой Е.В.).

3. Построение карт распределения гидрологических характеристик при недостаточности данных с использованием ГИС-технологий // Естественные и технические науки, № 12 (126), 2018. С. 177–180 (в соавторстве с Гайдуковой Е.В., Саковичем В.М.).

В других журналах:

4. Апробация методики долгосрочного прогнозирования статистических характеристик на речных бассейнах Ирана // Международный научно-исследовательский журнал, № 04 (58), Часть 1, 2017. – С. 80–86, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.58.117> (в соавторстве с Гайдуковой Е.В., Синкпеун Л.).

5. Методы расчета испарения с водосборов рек Сефидруд и Карун (Иран) // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований» в рамках XIII Большого географического фестиваля. – СПб: СПбГУ, 2017. – С. 254–259.

6. Построение двумерных гистограмм для рек Западной Африки // 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 (в соавторстве с Судаковой Н. В., Бонгу Э.).

7. Гидрологические характеристики стока рек Сефидруд и Карун (Иран) // 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.

8. *Joint assessment of the probability characteristics of long-term river run-off and evaporation in today's climate conditions and in the expected changes // International Journal of Engineering Research And Management (IJERM), ISSN: 2349-2058, Volume-03, Issue-06, 2016. – P. 83–86 (в соавторстве с Kovalenko Viktor V., Gaidukova Ekaterina V., Diawara H., Bongu E.).*

9. Учет испарения при моделировании процесса формирования речного стока в Западной Африке // Материалы III Международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике», г. Ростов-на-Дону, 2016. – С. 86–95 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Бонгу Э.).

10. Совместная оценка вероятностных характеристик многолетнего речного стока и испарения в условиях современного климата и ожидаемых его изменений // Евразийское Научное Объединение, т. 2, № 7 (41), 2018. – С. 139–141 (в соавторстве с Гайдуковой Е. В., Бонгу С.Э., Диавара Х.).

11. Применение методов пространственной интерполяции к гидрологическим данным на примере водосбора р. Карун (Иран) // Международный научно-исследовательский журнал, № 02 (80), 2019. – С. 37–42, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.80.2.006> (в соавторстве с Гайдуковой Е.В., Бурловым В.Г., Ахондали А.М.).

12. Разработка модели системы контроля и управления доступом в органе государственного управления // Сборник трудов V международной научно-практической конференции ИНФОГЕО 2018 «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий». – СПб: РГГМУ, 2018. – С. 184–190 (в соавторстве с Бурловым В.Г., Бровкиным А.М., Краеваевым Е.В.).

13. Выявление аномальных зон формирования речного стока для водозависимых отраслей экономики Ирана при изменении климата // Сборник трудов V международной научно-практической конференции ИНФОГЕО 2018 «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий». – СПб: РГГМУ, 2018. – С. 28–32 (в соавторстве с Гайдуковой Е.В.).

14. Разработка модели управления процессами обеспечения безопасности веб-сайта // Сборник трудов V международной научно-практической конференции ИНФОГЕО 2018 «Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий». – СПб: РГГМУ, 2018. – С. 198–203 (в соавторстве с Бурловым В.Г., Костаевой Е.Ю.).

ПРИЛОЖЕНИЕ К АВТОРЕФЕРАТУ

Таблица П.1

Рассчитанные гидрологические характеристики рек Ирана

Станция	$F, \text{ км}^2$	$h, \text{ мм}$	$C_v$	$C_s$	$r(1)$	$k$	$\beta$
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
<i>Gragoni – Ghezal ozon</i>	19618	53	0,61	0,92	0,27	0,17	1,39
<i>Iyanki Kand – Sajac rud</i>	2370	58	0,47	1,01	0,25	0,17	1,52
<i>Sarcham – Zanjan Rud</i>	4536	31	0,62	0,98	0,05	0,1	1,41
<i>Pole Dokhtar</i>	33021	49	0,52	0,80	0,32	0,16	1,65
<i>Motor Khane</i>	1802	94	0,58	0,91	0,30	0,35	1,15
<i>Ostor</i>	42081	63	0,51	1,07	0,28	0,20	1,48
<i>Gilave –Ghezal ozon</i>	49578	67	0,53	1,49	0,22	0,21	1,36
<i>Myane-Shari Chai</i>	1907	98	0,50	0,66	0,36	0,26	1,46
<i>Myane – Granko</i>	3542	137	0,43	0,47	0,32	0,46	0,93
<i>Mahneshan – Ghezelozon</i>	24511	53	0,49	0,81	0,32	0,17	1,62
<i>Shadi Abad – Chashmeshor</i>	2013	17	0,61	1,27	0,14	0,07	1,78
Бассейн р. Карун							
<i>Patave</i>	2800	574	0,43	0,3	–0,03	0,76	–
<i>Kata</i>	3059	400	0,34	0,61	0,016	0,54	–
<i>Barez</i>	8953	444	0,38	0,55	–0,054	0,68	–
<i>Kohe Sokhte</i>	3010	77	0,48	1,14	0,21	0,19	1,40
<i>Rahim Abad</i>	1729	108	0,30	0,98	0,25	0,23	1,35
<i>Tire</i>	3400	180	0,40	0,90	0,15	0,34	0,68
<i>Solegan</i>	1992	163	0,39	0,79	0,043	0,25	0,43
<i>Pole krakhbast</i>	2821	177	0,39	0,77	–0,015	0,32	–
<i>Armand</i>	9986	378	0,29	0,79	0,065	0,63	–1,47
<i>Behsht Abad</i>	3820	172	0,45	0,85	0,042	0,4	–0,60
<i>Sepid dash</i>	7174	210	0,40	1,08	0,045	0,36	–0,26
<i>Tange Panj (Sezar)</i>	9410	376	0,54	1,27	–0,019	0,58	–
<i>Tange Panj</i>	6432	746	0,36	1,49	–0,023	0,76	–
<i>Dashte bozorg</i>	2616	132	0,48	0,96	–0,14	0,4	–
Примечание: $F$ – площадь, $h$ – слой стока, $C_v$ – коэффициент вариации, $C_s$ – коэффициент асимметрии, $r(1)$ – коэффициент автокорреляция при годовой сдвиге, $k$ – коэффициент стока, $\beta$ – критерий устойчивости.							

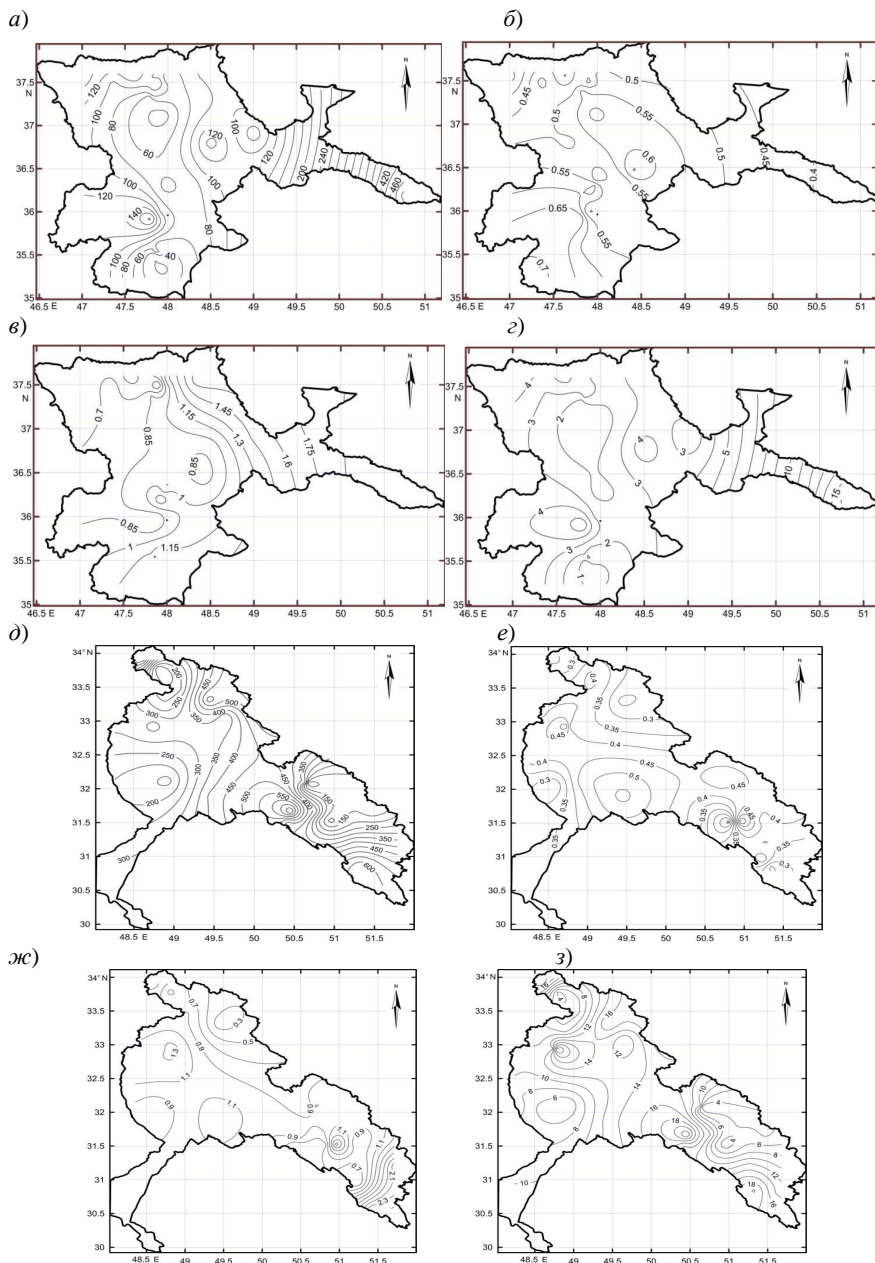


Рис. П.1. Карты распределения слоя стока,  $C_v$ ,  $C_s$  и модуля стока для бассейнов рек Сефидруд (а, б, в, г) и Карун (д, е, ж, з).

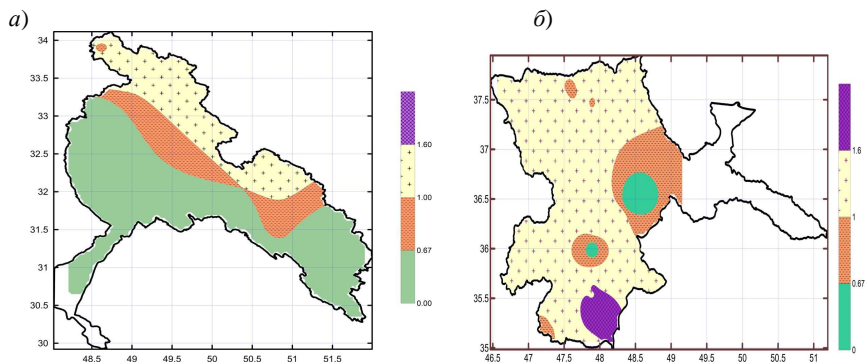


Рис. П.2. Электронное картографическое изображение распределения критерия устойчивости  $\beta$  по бассейнам рек Карун (а) и Сефидруд (б).

Таблица П.2

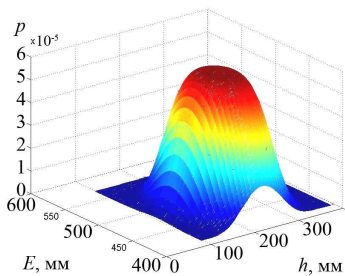
**Рассчитанные значения испарения**

Пост	$k_{исп}$	$C_v$	$C_s$	Однородность по Фишеру	Однородность по Стьюденту	$E$ , мм
Бассейн р. Карун						
Patave	0.31	0.38	0.14	+	+	245
Kata	0.29	0.39	0.28	+	+	131
Barez	0.25	0.41	1.08	-	+	135
Kohe sokhte	0.86	0.2	0.3	+	+	475
Raim Abad	0.81	0.27	0.3	+	+	485
Doroud	0.61	0.18	0.05	-	+	291
Solegan	0.78	0.23	0.46	-	+	568
Pole Krehkbast	0.64	0.32	0.57	+	+	305
Арман	0.38	0.36	-0.21	-	+	235
Sepid dasnt sezar	0.72	0.24	0.9	+	+	533
Tang e pang- sezar	0.37	0.35	-0.53	+	+	200
Tang e pang	0.36	0.33	0.57	+	+	405
Dashte bozorg	0.63	0.33	0.61	+	+	217
Бассейн р. Сефидруд						
Binalod	0.75	0.22	-0.14	+	+	307
Salamast Abad	0.87	0.41	1.35	-	+	320
Hashtat Joft	0.8	0.28	0.2	-	+	278
Ghrah goni	0.84	0.31	1.22	-	+	304
Yenki kand	0.85	0.28	-0.02	-	+	283
Sarcham	0.92	0.23	0.08	-	+	299
Pole Dokhtar	0.86	0.22	-0.14	-	+	302
Ighdomoosh	0.8	0.22	0.43	-	+	280
Mah neshan	0.83	0.31	1.11	-	+	294
Ghrango (Myane)	0.47	0.31	1.04	+	+	115

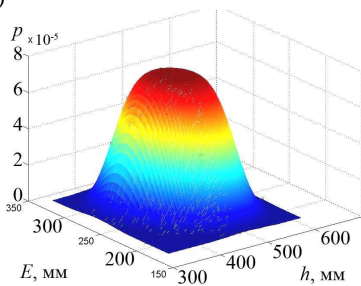
Продолжение табл. П.2

Пост	$k_{исп}$	$Cv$	$Cs$	Однородность по Фишеру	Однородность по Стьюденту	$E$ , мм
Shahre Chai (Myane)	0.75	0.21	-0.02	–	+	245
Octor	0.81	0.19	-0.17	+	+	268
Necareh Olya	0.55	0.31	1.19	–	+	262
Shadi Abad	0.92	0.31	-0.17	+	+	283
Gilvan	0.8	0.21	-0.06	–	+	262

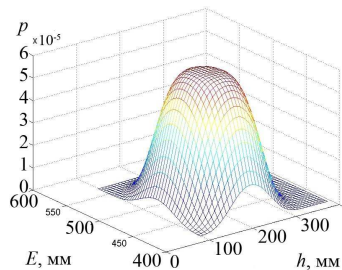
а)



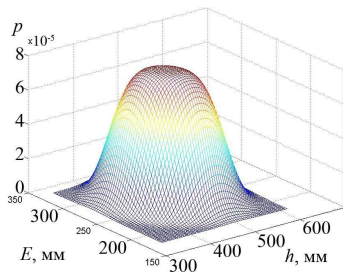
б)



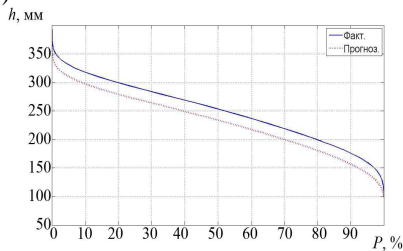
в)



г)



д)



е)

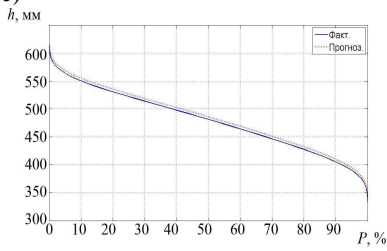


Рис. П.3. Примеры фактических (а, б) и сценарных (в, г) теоретических поверхностей плотности вероятности и условных кривых обеспеченности (д, е).

Таблица П.3

## Обеспеченные величины слоя стока бассейна р. Карун для современного и сценарных климатических условий

Река – пункт	Факт. слои стока (с 1957 по 2005 гг.)			Отклонения прогнозных значений слоя стока от фактических											
				РТК 2.6						РТК 8.5					
	$h_{0,1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.			с 2020 по 2049 гг.			с 2050 по 2079 гг.		
				$h_{0,1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0,1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0,1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$	$h_{0,1\%}$	$h_{1\%}$	$h_{10\%}$
<i>Patave</i>	1499	1229	902	11,8	9,4	5,1	2,3	-0,7	-5,6	4,8	2,1	-2,1	14,3	11,4	6,6
<i>Kata</i>	796	655	490	-5,2	-6,1	-7,6	-7,0	-11,4	-16,9	-1,4	-6,0	-11,2	0,6	-2,1	-5,4
<i>Barez</i>	1077	890	665	9,4	4,9	-1,5	-6,5	-9,8	-14,2	-53,2	-54,0	-55,8	-28,3	-29,2	-30,7
<i>Kohe Sokhte</i>	267	203	134	40,4	30,5	11,9	67,3	42,6	12,7	66,9	42,0	12,6	70,0	45,5	16,0
<i>Rahim Abad</i>	253	205	151	11,5	5,4	-2,6	6,7	-1,0	-9,7	11,3	4,3	-3,6	12,4	6,1	-0,6
<i>Dorud</i>	494	392	276	25,3	18,4	6,9	28,5	17,2	1,9	30,6	20,2	5,9	34,9	24,1	9,6
<i>Solegan</i>	433	347	248	15,7	13,3	8,5	10,7	6,3	-1,3	4,3	0,9	-4,4	17,1	14,0	8,5
<i>Pole krakhbast</i>	476	383	275	-4,2	-6,3	-11,6	-11,7	-14,7	-20,2	-11,4	-13,8	-18,1	-1,9	-3,8	-8,0
<i>Armand</i>	842	695	526	12,1	9,1	3,8	10,3	4,0	-5,1	13,1	6,6	-1,8	17,8	12,6	5,6
<i>Sepid dast (sezar)</i>	604	471	325	30,6	23,4	11,1	38,7	25,2	7,3	41,2	28,4	10,9	38,9	27,8	13,0
<i>Tange Panj (sezar)</i>	1364	1018	646	4,8	5,2	3,1	2,3	1,3	-2,9	2,8	3,2	0,9	10,9	10,0	5,9
<i>Behsht Abad</i>	489	385	267	39,3	29,6	12,0	54,2	31,4	3,0	57,0	37,3	13,1	63,6	42,1	14,6
<i>Dashte bozorg</i>	425	329	221	-8,5	-7,3	-5,4	-13,2	-15,0	-17,6	-15,0	-13,9	-12,6	-37,3	-27,5	-11,8
<i>Tange Panj</i>	2147	1641	1108	33,6	23,3	6,6	42,1	22,3	-0,6	42,0	23,8	2,6	46,3	28,3	7,3
Средние отклонения				15,5	10,9	2,9	16,0	7,0	-4,9	13,8	5,8	-4,6	18,5	11,4	2,2



*Отпечатано с готового оригинал-макета*

Подписано в печать с оригинал-макета

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Уч.-изд. л. 1,0. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

РГГМУ, 192007, СПб, Воронежская ул., 79