

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Белозерова Елена Алексеевна

Геоинформационная система управления геоэкологическим риском

1.6.20 – Геоинформатика, картография

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Красногорская Наталия Николаевна

Уфа – 2023

Содержание

Список сокращений	6
Введение.....	7
Глава 1 Современное состояние применения информационных технологий в управлении водными ресурсами.....	15
1.1 Опыт применения геоинформационных систем в управлении водными ресурсами	16
1.2 Современные подходы к прогнозированию водообеспеченности на территориях с недостаточной гидрологической изученностью	24
1.3 Фрактальная размерность водных объектов, как интегральный показатель гидрографической сети (качества водных ресурсов)	30
1.3.1 Методы исследования фрактальной размерности природных объектов	33
1.4 Управление рисками водных ресурсов на территории. Построение системы поддержки принятия решений в управлении водными ресурсами.....	42
Результаты и выводы по главе 1	47
Глава 2 Характеристика объекта исследования, исходные данные и методы исследования.....	49
2.1 Общая характеристика исходных данных	50
2.1.1. Гидрологические и гидрохимические данные	50
2.1.2 Пространственные данные	55
2.2 Методы исследования водосборного бассейна р.Уфы.....	56
2.2.1 Геостатистический метод определения расходов воды в реках на основе цифровой модели рельефа (метод корреляции карт)	56
2.2.1.1 Подготовка ежедневных данных о расходах воды в исследуемых створах. Анализ данных.....	59
2.2.1.2 Выбор метода интерполяции и функции для моделирования поверхности	60
2.2.1.3 Методика геомоделирования расходов воды в реках методом корреляции карт.....	66

2.2.2 Метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока	68
2.2.3 Фрактальный анализ	73
Результаты и выводы по главе 2	86
Глава 3. Определение расходов воды в реках водосборной территории с недостаточной гидрологической изученностью	88
3.1 Моделирование ежедневных расходов воды на водосборах неохваченных наблюдениями методом корреляции карт	89
3.2 Метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока	111
Результаты и выводы по главе 3	114
Глава 4. Методология определения фрактальной размерности водосборной территории	115
4.1 Подготовка слоя гидрографии рек для фрактального анализа.....	116
4.2 Сравнительный анализ программных продуктов применяемых, для определения фрактальной размерности.....	119
4.3 Описание работы программы «Автоматизированный расчет фрактальной размерности» (АРФР)	123
4.4 Результаты расчета фрактальной размерности рек водосборного бассейна р. Уфа.....	127
4.5 Обоснование выбора программы и масштаба исследования для определения фрактальной размерности	133
4.5.1 Выбор программы для расчета фрактальной размерности на основании критерия Романовского	134
4.5.2 Определение наиболее достоверных результатов расчета фрактальной размерности с помощью кривых обеспеченности	135
4.5.3 Исследование масштабной инвариантности фрактальной размерности рек водосборного бассейна р. Уфа	138
4.5.4 Оценка влияния изменения взаимного расположение расчетной сетки и исследуемого объекта	142

4.6 Фрактальная размерность как интегральный показатель самоочищающей способности водного объекта	144
4.6.1 Определение доли рек с длинами заданного диапазона на основе фрактальной размерности водосборного бассейна.....	144
4.6.2 Фрактальная модель водности водосбора на примере бассейна р. Уфа	146
4.6.3 Определение зависимости между фрактальной размерностью гидрографической сети и расходами воды в реках	150
Результаты и выводы по главе 4	151
Глава 5. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления водными ресурсами	153
5.1 Методика определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно – территориальных единиц	156
5.2 Определение риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфа	158
5.3 Определение зависимости расходов воды в реках от фрактальной размерности гидрографической сети в границах административно – территориального деления	161
5.4 Определение риска загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований.....	162
5.5 Определение средневзвешенного геоэкологического риска истощения и загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований	164
5.6 Система поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами	167
5.7 Разработка геоинформационной системы управления геоэкологическими рисками.....	169
Результаты и выводы по главе 5	173
Выводы	174
Список литературы	176
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	202

ПРИЛОЖЕНИЕ А	203
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	205
ПРИЛОЖЕНИЕ В	208

Список сокращений

АРФР – автоматизированный расчет фрактальной размерности

БД – база данных

ГИС – геоинформационная система

МО – муниципальное образование

ПО – программное обеспечение

УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков

ЦМР – цифровая модель рельефа

БПК – биологическое потребление кислорода

ХПК – химическое потребление кислорода

РБ – Республика Башкортостан

Введение

Актуальность темы исследования

В настоящее время основной вектор в системе принятия решений при управлении рисками на водосборной территории смещается в сторону создания алгоритмов и технологий, использующих разнородные данные: географические, гидрологические, гидрохимические, климатические, демографические, так и различных типов: текстовые, цифровые, изображения, сигналы и др.

При этом, с одной стороны существует информационный поток данных, с другой стороны - задачи, алгоритмы, технологии получения и обработки данных. На пересечении этих потоков формируются системы принятия управленческих решений.

В Российской Федерации в рамках национального проекта «Цифровая экономика» происходит масштабная трансформация хозяйственной деятельности страны. Согласно Указу Президента РФ «О Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017—2030 годы» ключевыми факторами производства в цифровой экономике являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых, по сравнению с традиционными формами хозяйствования, позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства.

В условиях цифровой трансформации экономики создание интеллектуальных систем, способных использовать различные типы и виды данных об окружающей среде в целях принятия решений для эффективного управления водными ресурсами, становятся особенно актуальным.

Цель работы: создание геоинформационной системы поддержки принятия решений при управления водными ресурсами муниципальных образований на основе разнородных пространственных данных.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи:**

1. Создание баз данных характеристик (гидрологических, гидрохимических) исследуемой водосборной территории;

Паспорт специальности п. 3 Модели и структуры пространственных данных. Базы пространственных данных, пространственные метаданные. Классификация и кодирование картографической информации. Цифровые карты;

2. Разработка методики геомоделирования расходов воды в реках с недостаточной гидрологической изученностью

Паспорт специальности п.7 Картографические и геоинформационные методы и технологии анализа пространственных данных, моделирования пространственных явлений, объектов, процессов, отношений и систем;

3. Разработка методологии определения фрактальной размерности гидрографической сети;

Паспорт специальности п.1 Общие вопросы и теоретические концепции геоинформатики и картографии. Взаимодействие геоинформатики и картографии с другими областями знаний.

4. Создание геоинформационной системы для поддержки принятия решений при управлении геоэкологическим риском истощения и загрязнения водосборной территории на основе разнородной пространственной информации.

Паспорт специальности п.20 Базы знаний и экспертные геоинформационные системы для принятия решений в области проблем управления территориями.

п. 21. Геоинформационный и картографический мониторинг природных и социально-экономических процессов.

Объект исследования: геоинформационная система обработки разнородных пространственных данных (на примере р. Уфа).

Предмет исследования: технология использования разнородных пространственных данных при управлении геоэкологическим риском.

Степень разработанности темы

1. Геоинформационная поддержка при управлении природными рисками: Алексеева Е.С., Алексеев С.С., Бурлов В.Г., Киселев А.В., Крымский В.Г., Нафикова Э.В., Фридман К.Б., Borges R.C., Caldas V. G., Coppock J. T., Venturados Santos F.,

2. Моделированию расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью посвящен международный проект PUB (prediction on ungauged basins), созданный по инициативе Международной организации гидрологических наук (IAHS) 2003-2013 гг. В рамках этого проекта работали несколько международных научно-исследовательских коллектива: Arheimer B., Blöschl G., Blume T., Clark M.P., Cudennec C., Ehret U., Fenicia F., Freer J.E., Gelfan A., Gupta H.V., Hrachowitz M., Hughes D.A., Hut R.W., McDonnell J.J., Montanari A., Pande S., Pomeroy J.W., Savenije H.H.G., Sivapalan M., Tetzlaff D., Troch P.A., Uhlenbrook S., Wagener T., Winsemius H.C., Woods R.A., Zehe E. В этот период в РФ в Государственном гидрологическом институте разработаны: Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений и Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений.

3. Фрактальная геометрия при изучении природных объектов и самоорганизующихся систем использовалась исследователями: Гайдукова Е.В., Лаврусевич А.А., Мельник М. А., Сметанин В.И., Хоменко В.П., Цветков И.В., Чупиова С.А., Ant'ón J. M., Bhardwaj R., Bocquillon C., Gasc'o G., Grau J. B., Halley J. M., Kenkel N.C., Mandelbrot B., Moussa R., Parmar K. S., Rinaldo A., Rodriguez-Iturbe I., Saal A., Tarquis A. M., Tokunaga E., Walker D.J.

4. Управление водными ресурсами с применением геоинформационных систем: Абдуллин А.Х., Гвоздев В.Е., Истомин Е.П., Павлов С.В., Соколов А.Г., Татарникова Т.М., Христодуло О.И., Яйли Е.А., Biswas A.K., Johnson L.E., Longobardi A., Rahaman M.M., Tortajada C., Tziavos I.N., Varis O.

Вместе с тем, использование разнородных пространственных данных в системах поддержки принятия решения при управлении водными ресурсами на территориях муниципальных образований изучено недостаточно.

Методы исследования. В качестве методов анализа использовались:

Методы определения расходов воды в водотоках, недостаточно обеспеченных гидрологическими данными, в частности:

- геостатистический метод определения расходов воды в реках на основе цифровой модели рельефа (метод корреляции карт);
- метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока;
- фрактальный анализ гидрографической сети водосборного бассейна в пяти масштабах (на примере р. Уфа);

Научная новизна:

1. Разработана и реализована методика геомоделирования расходов воды в реках при недостаточности данных гидрометрических наблюдений.
2. Разработана методология определения фрактальной размерности гидрографической сети.
3. Установлены зависимости между фрактальной размерностью гидрографической сети и ее гидрологическими характеристиками: соотношения рек с длинами заданного диапазона, распределение коэффициента наводнений на водосборной территории, расход воды в реках.
4. Создана геоинформационная системы для поддержки принятия решений при управлении рисками истощения и загрязнения водосборной территории на основе разнородной пространственной информации.

Теоретическая значимость исследований.

Раскрыты особенности прогнозирования расходов воды в реках на территории с недостаточной гидрологической изученностью. Доказано, что пространственная близость водотоков не является универсальным критерием для выбора реки-аналога при определении расходов воды. Изложен подход к

прогнозированию расходов воды в реках, основанный на классификации рек по размеру

Изучены факторы, влияющие на расчет фрактальной размерности гидрографических сетей. Изложена методология определения фрактальной размерности водосборной территории, при исследовании водных ресурсов. Доказана взаимосвязь фрактальной размерности гидрографической сети с такими параметрами как: разветвленность речной сети, водность водосборной территории (коэффициент наводнений) и среднего расхода воды в реках, что расширяющие границы применения полученных результатов. В частности, делает возможным использование фрактальной размерности гидрографической сети в качестве интегральной характеристики водосборной территории.

Проведена модернизация модели по управлению геоэкологическими рисками на водосборной территории. Изложена модель геоинформационной системы для определения геоэкологического риска на водосборной территории, основанная на обработке разнородных пространственных данных.

Практическая значимость работы:

1. Созданы базы данных и внедрены в учебный процесс:

Гидрохимические показатели р. Белая и ее притоков;

Основные характеристики поймы р. Белая и ее основных притоков.

2. Разработаны программы для ЭВМ и внедрены в практическую деятельность:

- автоматизированный расчет фрактальной размерности;
- расчет геоэкологического риска количественного и качественного истощения водных ресурсов;
- определение доли рек с длинами заданного диапазона на основе фрактальной размерности водосборного бассейна;
- моделирование расходов воды в реках на основе данных эталонного поста.

3. Разработана геоинформационная система для оценки риска истощения и загрязнения поверхностных вод с использованием разнородных пространственных данных.

4. Представлена методология использования пространственных данных разных типов для проектирования систем поддержки принятия решений для управления геоэкологическим риском в границах хозяйствующего субъекта.

Степень достоверности подтверждается:

- согласованностью полученных результатов с трудами других исследователей и внутренней непротиворечивости результатов исследования их фундаментальным основам;
- использованием достоверных и проверенных данных;
- использованием нормативных документов и правил в области проектирования геоинформационных систем;
- применением апробированных методик математического и геоинформационного моделирования, статистики, системного анализа;
- апробацией результатов исследования на конференциях и публикациями в открытой печати.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика геомоделирования расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью.
2. Методология определения фрактальной размерности гидрографической сети.
3. Научно-техническое обоснование использования фрактальной размерности в качестве интегральной водосборной территории.
4. Закономерность изменения фрактальной размерности гидрографической сети в зависимости от разветвленности речной сети, водности водосборной территории (коэффициента наводнений) и расходов воды в реках.

5. Модель геоинформационной системы прогнозирования риска истощения и загрязнения водосборной территории на основе разнородных пространственных данных.

Личный вклад автора заключается в:

проведении всех этапов исследования, разработке положений, представленных в настоящей диссертационной работе, в том числе методологии определения фрактальной размерности водосборной территории, методики оценки состояния водосборных территорий при недостаточности данных гидрометрических наблюдений, обработке данных и проведении расчетов, личное участие в апробации результатов, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Апробация работы: Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта РФФИ 15-35-50974 «Исследование зависимости гидродинамического самоочищения малых рек от их морфологических свойств на основе фрактальной геометрии» (2014 г.) и гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (2015 г.).

Основные положения и результаты работы доложены на следующих научных конференциях: X–XIV Международная научно-техническая конференция Наука, образование, производство в решении экологических проблем «Экология» (г. Уфа, 2013-2018); VIII–XII Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2014-2018); I International Scientific Conference Global Science and Innovation (Chicago, December 17-18th, 2013); X-XI Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых (г. Уфа 2013, 2015 гг.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» (г. Воронеж, 2014 г.); XIX Всероссийская студенческая научно-практическая конференция с международным участием (г. Иркутск, 2014 г.); XIV Международная научная конференция (г. Минск, Республика Беларусь, 2014 г.); International

Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM –2014; X Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2015 г.); Международная научно-техническая конференция «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты Окружающей Среды» (г. Белгород, 2015 г.); VIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Баумана, г. Москва 2015 г.); VII Всероссийская научно-практическая конференция «Геоинформационное картографирование в регионах России» (г. Воронеж, 2015 г.); VII Международная научно-техническая конференция «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно транспортных комплексов ELPIT2015» (г. Самара – г. Тольятти, 2015 г.); VIII Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы социально-экономической и экологической безопасности поволжского региона"(г. Казань, 2016 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (г. Пермь, 2017 г.); XIV-XV, XX Всероссийская конференция – школа «Химия и инженерная экология» (г. Казань, 2014-2015, 2020 гг.).

Публикации: По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 7 статей в журналах, включенных в перечень рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых в реферативных базах Web of Science и Scopus, 2 электронные базы данных и 4 программы для ЭВМ.

Структура и объем работы: Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, библиографического списка из 213 наименований, изложена на 208 листах, содержит рисунков и таблиц, 3 приложения.

Глава 1 Современное состояние применения информационных технологий в управлении водными ресурсами

При управлении водными ресурсами одним из главных источников информации являются гидрометеорологические службы, в чьи задачи входит сбор, хранение, распространение и обработка геоданных.

Увеличение количества структурированных данных позволяет использовать их одновременно для целей различных ведомств. Таким образом, основной вектор в системе принятия решений при управлении рисками на водосборной территории смещается в сторону создания алгоритмов и технологий, использующих разнородные пространственные данные: географические, гидрологические, гидрохимические, климатические, демографические, так и различных типов: текстовые, цифровые, изображения, сигналы и др. Это необходимо для удовлетворения запросов населения на улучшение качества жизни и позволяет прогнозировать экстремальные гидрологические ситуации на водосборе, рационально управлять водными ресурсами.

Таким образом, с одной стороны существует информационный поток данных, с другой стороны - задачи, алгоритмы, технологии получения и обработки данных. На пересечении этих потоков формируются системы принятия управленческих решений на основе данных.

В России, в рамках национального проекта «Цифровая экономика», происходит масштабная трансформация хозяйственной деятельности страны. Согласно Указу Президента РФ «О Стратегии развития информационного общества в РФ на 2017—2030 годы» ключевыми факторами производства в цифровой экономике являются данные в цифровом виде. Обработка больших объемов данных и использование результатов их анализа позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства.

В настоящий момент одной из актуальных задач является создание интеллектуальных систем, способных использовать различные типы и виды

данных в целях принятия управленческих решений, автоматически моделировать и дополнять недостающую или пропущенную информацию.

В условиях цифровой трансформации обработка больших данных об окружающей среде, применение геоинформационного моделирования в целях эффективного управления водными ресурсами становятся особенно актуальными.

1.1 Опыт применения геоинформационных систем в управлении водными ресурсами

Пресная вода считается одним из самых ценных ресурсов на Земле, однако ее запасы уязвимы без адекватных стратегий управления. В работе [1] сказано, что нагрузка на водные ресурсы увеличивается по мере роста спроса на них и обострения последствий изменения климата. В странах с высоким уровнем нагрузки на водные ресурсы в настоящее время проживают более 2 миллиардов человек. Свыше 4 миллиардов сталкиваются с серьезной нехваткой воды, как минимум 1 месяц в году.

Глобальный средний дефицит воды - 11%, однако в 31 стране мира дефицит воды составляет от 25% (минимальный порог дефицита воды) до 70%, а в 22 странах этот показатель превышает 70%, что означает серьезный дефицит воды.

Деревяго и Дубенок в работе [1] объединяют основные факторы, обуславливающие проблему дефицита и риска истощения водных ресурсов в три группы:

- природные и климатические факторы;
- демографический рост, миграция и быстрая урбанизация;
- быстрое развитие экономики и нерациональное использование воды в отдельных ее секторах, а также ошибки отраслевого планирования – от выбора структуры посевов водоемких культур в поливном земледелии, до ошибок в территориальном размещении производительных сил (водоемких производств).

При решении проблем рационального водопользования в рамках административно-территориального деления (субъекты, муниципальные образования, районы, городские округа и др.) возникает целый ряд проблем методического и методологического характера:

- неопределенность критериев для оценки экологического состояния водных объектов;
- поливариантность взаимосвязей количественных и качественных характеристик водного объекта из-за региональных природных, антропогенных, климатических особенностей территории [2];
- отсутствие привязки гидрометеорологических данных к административно-территориальным единицам;
- отсутствие системного подхода в сборе и обработке данных, проблемы совместимости баз данных, формируемые различными организациями и ведомствами [3, 4].

Таким образом, ошибки в оценке водных ресурсов могут быть связаны с различными уровнями территориального планирования (муниципальный, региональный, национальный) и усугубляться транскалярностью исходных данных для оценки (различные форматы и разрешения данных).

Для эффективного управления водными ресурсами все чаще применяются геоинформационные системы [5–8]. Так в работе [9] приведен пример геоинформационной системы для управления водными ресурсами участка р. Арканзас (США), показано, что внедрение ГИС позволяет сохранить качество поверхностных и подземных вод, спланировать количество воды, необходимое на различные нужды и не допустить нарушения межрегиональных договоренностей по водопользованию.

В статье [10] изложены проблемы муниципальных образований Канады, при реализации стратегий охраны источников воды в провинции Квебек. Авторами предлагается внедрение программного обеспечения (ПО), которое может интегрировать данные о землепользовании с данными о качестве воды,

предоставляемые несколькими организациями в различных форматах, не всегда совместимых между собой. ПО представляет собой гибкую программную платформу для сбора и обмена данными и их анализа в целях принятия управленческих решений.

Ученые из Индии использовали ГИС, как инструмент по оценке перераспределения водных ресурсов, вследствие урбанизации на примере региона Хайдарабад [11].

В работах [12 – 15] предлагается управлять водными ресурсами и территориями с использованием данных дистанционного зондирования и космических снимков, собираемых в режиме реального времени, интегрированных в ГИС системы для целей сельского хозяйства и водоснабжения населенных пунктов, а также прогнозирования экстремальных ситуаций на водосборе. Например, в работе [15] описана ГИС система на примере региона Бари Доаб в Пакистане, позволяющая оценить дефицит воды для полива и планировать источники забора воды в зависимости от сезона.

Некоторые исследователи предлагают совмещать современные вычислительные технологии с геоинформационными системами. Например, в работе [16] рассматривается использование методов нечеткой логики и ГИС для определения качества подземных вод, выделения участков с водой пригодной для питьевого водоснабжения. В работе [17] авторами предложена экспертная система принятия решений для управления водными ресурсами на основе облачных вычислений.

С помощью геоинформационных систем [18, 19] оценивался риск количественного и качественного истощения водных ресурсов для бассейнов исследуемых рек.

В Российской Федерации деятельность по управлению водными ресурсами страны осуществляется Федеральным агентством водных ресурсов (Росводресурсов). Для эффективного управления хозяйственной и производственной деятельностью и оперативного обеспечения руководства

полной и достоверной пространственной информацией авторами [20] была разработана и построена геоинформационная система Росводресурсов в виде совокупности технических, программных и информационных средств, обеспечивающих ввод, хранение, обработку и интегрированное представление пространственных и атрибутивных данных для решения проблем планирования и управления на разных уровнях: федеральном, бассейновом, территориальном и местном.

Анализ решаемых в агентстве задач и функциональных возможностей существующих информационных систем показал, что одни и те же данные фигурируют в различных, функционирующих автономно, системах. Вся информация, необходимая для управления водными ресурсами, характеризует географически распределенные объекты. Однако в агентстве отсутствуют системы обработки пространственно распределенной информации. И, наконец, существующие автоматизированные системы не покрывают всего множества задач, связанных с обеспечением информационной поддержки оперативного и стратегического управления водными ресурсами Российской Федерации [21]. Поэтому при создании геоинформационной системы Росводресурсов учитывались существующие информационные системы и использовать накопленные атрибутивные данные. Исходя из этого, создана следующая структура ГИС, представленная на рисунке 1.1.

База геоданных (БГД) ГИС «Росводресурсы» содержит картографическую, атрибутивную, текстовую и графическую информацию, архивы космических снимков. Разработка ГИС «Росводресурсы» позволило решить нескольких задач:

- Сравнительный анализ и зонирование территории РФ по показателям водных ресурсов;
- Моделирование зон затопления при разрушении ГТС;
- Моделирование аварийных разливов и распространения загрязнителей в водных объектах, а также при угрозе их попадания в водные объекты [21, 22].

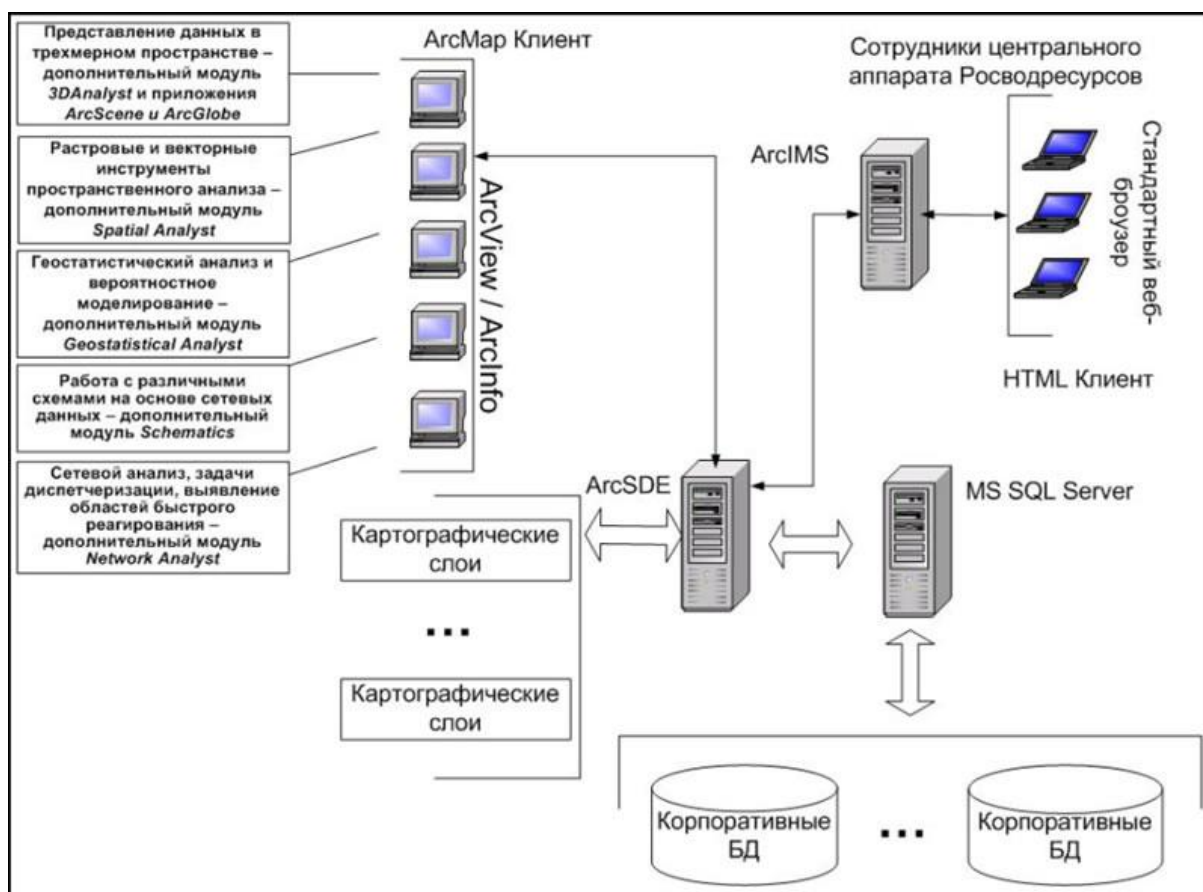


Рисунок 1.1- Структура типового элемента
ГИС Росводресурсов [21]

Еще одной организацией, в которой пространственная информация территориально распределенных объектов играет значительную роль и существует реальная необходимость в автоматизации задач, связанных с контролем состояния природных ресурсов, является Министерство природопользования и охраны окружающей среды РБ (Минэкологии РБ).

В своей деятельности Минэкологии РБ создает и ведет республиканский фонд информации по природным ресурсам, охране окружающей среды и экологической безопасности, осуществляет обмен, передачу и распространение этой информации, участвует в создании информационных систем для нужд природопользования, охраны окружающей среды, экологической безопасности и сохранения биологического разнообразия [23].

Управление природными ресурсами на территории РБ осуществляются на основе следующей информации:

- а) об объектах управления (собственно природных, водных объектах, объектах размещения отходов и т.д.);
- б) об «окружении» указанных объектов (природном и антропогенном);
- в) о показателях, характеризующих основные финансовые, организационные, технические, экологические и другие аспекты результатов осуществляемых действий.

На рисунке 1.2 представлена архитектура автоматизированной системы поддержки принятия решений по управлению природными ресурсами и охраной окружающей среды (АСППР УПР и ООС РБ) с компонентами комплексной ГИС.

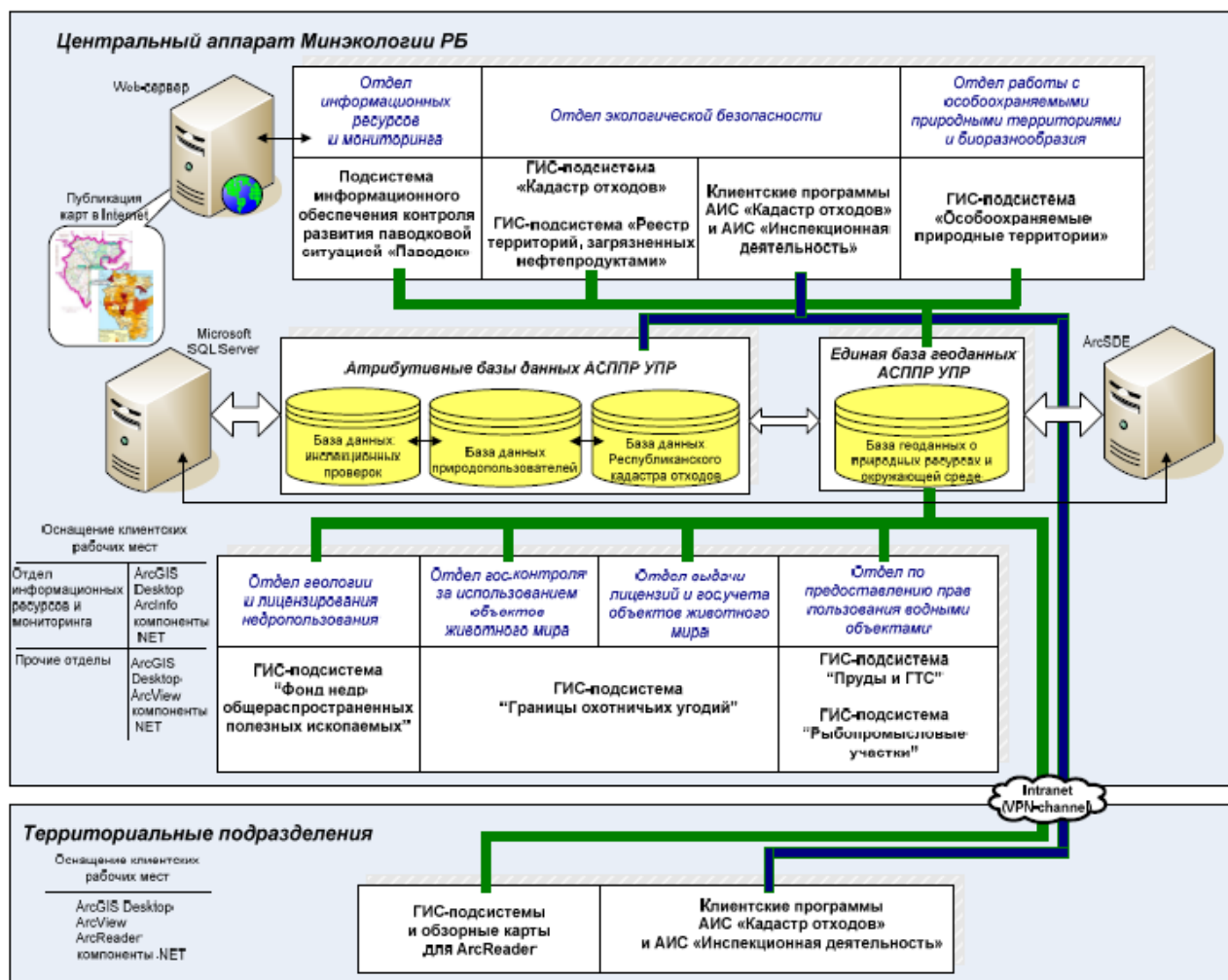


Рисунок 1.2 Архитектура АСППР УПР и ООС РБ с компонентами комплексной ГИС [23]

Автор [24] отмечает, что одной из основных проблем, возникающих при проектировании и создании баз данных, заключается в необходимости обеспечения одновременной работы с разнородными источниками данных, несогласованности их структур и форматов с масштабами и количеством исходных данных.

Одной из первых задач, для которой были применены геоинформационные технологии в области водных ресурсов и охраны окружающей среды в Республике Башкортостан стала автоматизация контроля развития паводковой ситуации - ГИС “Паводок” [25]. Структура системы представлена на рисунке 1.3:

- 1) блок получения космических снимков;
- 2) архив космических снимков;
- 3) блок обработки космических снимков;
- 4) база данных обработанных космических снимков;
- 5) геоинформационная система водных ресурсов

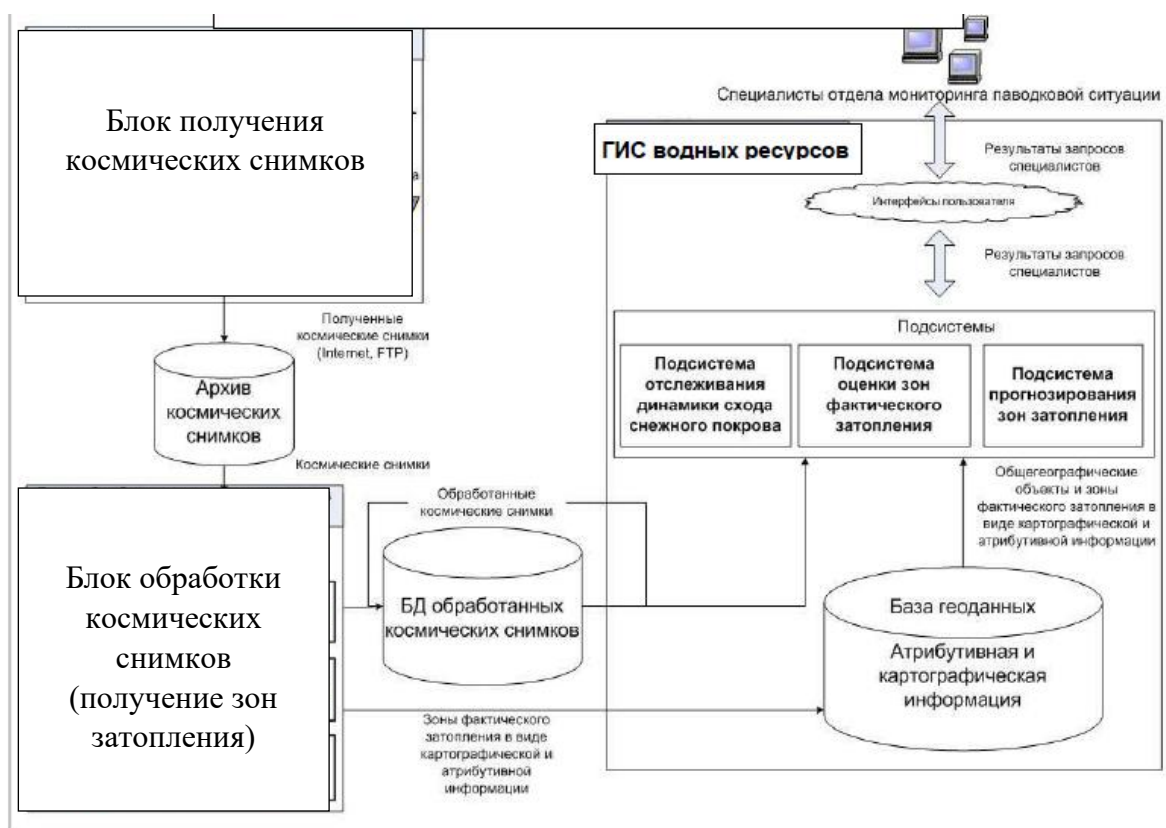


Рисунок 1.3 - Структура информационной системы мониторинга паводковой ситуации [25]

Результатом работы информационной системы является топографическая карта с нанесенными на нее зонами фактического затопления [26]. Полученные результаты позволяют определять по оперативным и архивным космическим снимкам зоны фактического затопления и подтопления территорий на выбранную дату, отображать эту информацию на карте, формировать отчеты по результатам запросов пользователей о зонах фактического затопления и подтопления территорий РБ во время весеннего паводка [27].

Однако, в работах, посвящённых тематике управления водными ресурсами и оценке риска возникновения экстремальных гидрологических ситуаций, часто применяется бассейновый подход, т.е. все характеристики рассчитываются для водосборной территории. Между тем, водосборные территории и административно - территориальных границы не всегда совпадают и этот факт затрудняет принятие управленческих решений на уровне субъектов, районов, муниципальных образований и др.

В настоящий момент одним из трендов цифровой экономики является управление на основе данных, т.е. выстраивание систем таким образом, чтобы собирать совокупность необходимых данных, анализировать их и принимать решения на основе результатов анализа. В управлении водными ресурсами задача усложняется тем, что данные собираются различными организациями и ведомствами, в различных форматах (текст, изображение, сигналы и др.). Ошибки в оценке водных ресурсов могут быть связаны с различными уровнями территориального планирования (муниципальный, региональный, национальный) и усугубляться транскалярностью исходных данных для оценки (различные форматы и разрешения данных). Также одной из актуальных проблем является нехватка данных для принятия управленческих решений.

В настоящей работе предложена методика оценки риска истощения и загрязнения водных объектов в рамках административно-территориального деления с использованием геоинформационных систем. И на основе методики разработана система поддержки принятия решения при управлении водными

ресурсами. Для апробации методики выбрана территория водосборного бассейна р. Уфа и муниципальные образования, расположенные на этой территории.

1.2 Современные подходы к прогнозированию водообеспеченности на территориях с недостаточной гидрологической изученностью

При управлении водными ресурсами возникает проблема недостатка первичных данных, в частности данных о расходах воды в реках.

Определение характеристик речного стока и других компонентов гидрологического цикла водосборов, характеризующихся слабой гидрологической изученностью, является одной из важнейших проблем водного хозяйства. Для восполнения нехватки информации с гидрологических постов Международная ассоциация гидрологических наук (МАГН) в 2003 году создала проект Predictions in Ungauged Basins (PUB), направленный на повышение достоверности гидрологических прогнозов. Рабочие группы проекта стремились стимулировать разработку методов, используемых для прогнозирования речного стока, наносов, качества воды, основанных на улучшенном понимании и представлении физических процессов внутри и вокруг гидрологического цикла [28].

Анализ литературных данных в реферативной базе Scopus в течение научной декады PUB 2003-2012 гг. показал, что основная доля научных публикаций, по темам связанным с неизученными водосборами, приходится на зарубежных исследователей [29-35].

В этот период в РФ в Государственном гидрологическом институте разработаны: Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений и Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений [36, 37].

Проблема малоизученных водосборных территорий актуальна и для РФ, ввиду большой площади, неравномерного распределения водомерных постов по территории страны [38]. (рисунок 1.4).

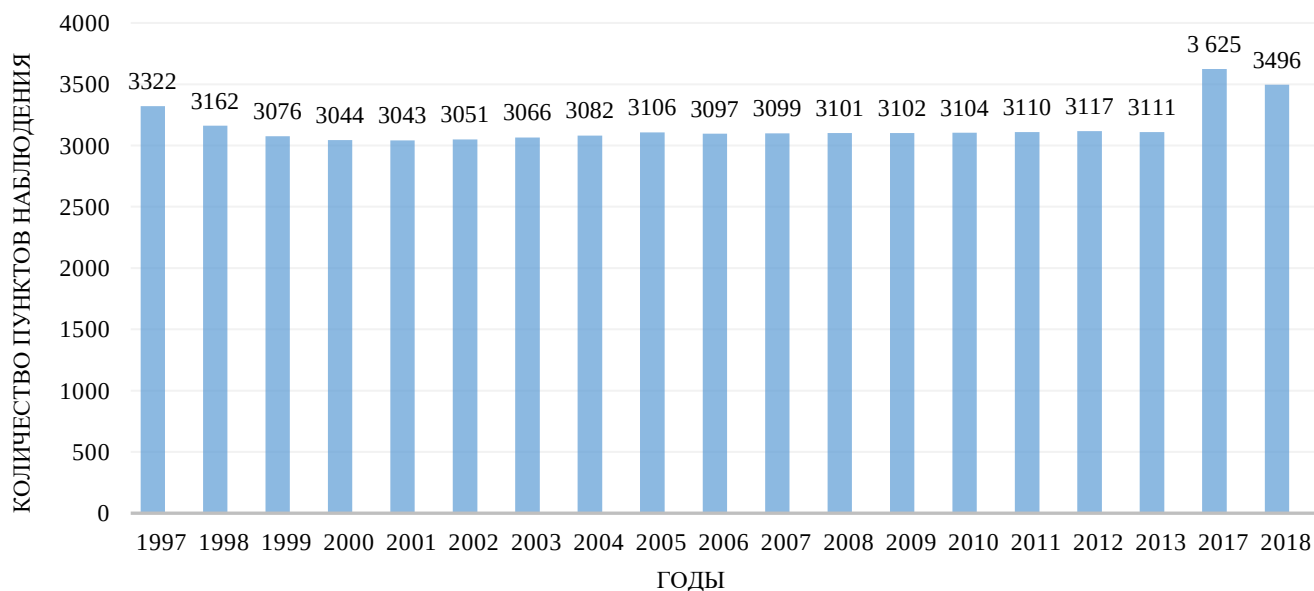


Рисунок 1.4 – Статистика изменения количества гидрометеорологических постов в РФ в период 1997-2018 гг. [39]

Расположение пунктов наблюдения и периодичность контроля за качеством поверхностных вод определено ГОСТ и РД [40, 41]. В соответствии с ГОСТом, расположение пунктов контроля устанавливается с учетом состояния и перспективы использования водного объекта на основании предварительных исследований. Наблюдения за качеством вод ведутся в основные фазы гидрологического режима: на пике, на подъеме, на спаде половодья, в периоды летне-осенней и зимней межени и осенних паводков [42].

Нехватка информации с гидрологических постов обуславливает развитие альтернативных методов получения информации о расходах воды [43].

На рисунке 1.5 представлены существующие в научной литературе методы геомоделирования параметров для расчета речного стока водосборов, неохваченных наблюдениями.

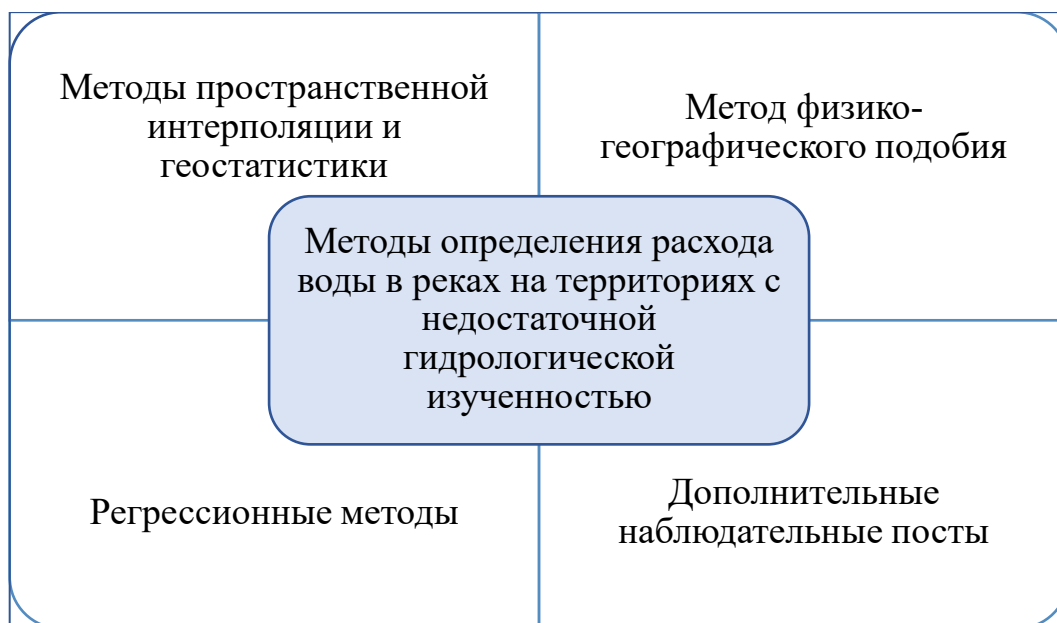


Рисунок 1.5 – Методы определения расхода воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью

Методы пространственной интерполяции и геостатистики основываются только на гидрологической информации в пунктах, где проводятся наблюдения. К этим методам относится картирование или осреднение в однородном районе параметров распределения годового стока на основе всей имеющейся в исследуемом районе гидрометрической информации за годовым стоком рек [44].

Авторы [36] отмечают, что в гидрологических расчетах на сегодняшний день ГИС – технологии используются редко, однако имеют большой потенциал, в частности, при определении расчетных характеристик на территориях с недостаточной гидрологической изученностью.

Большинство геостатических методов принадлежит семейству методов кригинга. К наиболее часто реализуемым относят одинарный, простой, универсальный, вероятностный, индикаторный и дизъюнктивный модели кригинга, а также их аналоги в кокригинге. Данные методы создают не только поверхности интерполяции, но и поверхности ошибок и неопределенностей, которые указывают на качество прогноза. Геостатические методы интерполяции измеряют пространственную автокорреляцию в измеренных точках и рассчитывают

пространственную конфигурацию опорных точек вокруг интерполируемого местоположения [45]. Для определения выходного значения, для всех направлений, кригинг использует математическую функцию для определенного количества точек, или всех точек, в пределах заданного радиуса. Кригинг имеет две основные цели: количественная оценка пространственной структуры данных и создание интерполяций [46].

Методы пространственного или физико-географического подобия основывается на следующем теоретическом положении: под влиянием подобных факторов формируются генетически близкие водосборные бассейны, которые при однотипных воздействиях испытывают сходные изменения.

Критерием близости или подобия является параметр эвклидова расстояния между водосбором, необеспеченным данными наблюдения, и водосбором-мишенью (изученный водосбор с достаточно длинными рядами наблюдений) [28]. Сущность методов заключается в том, что после нахождения аналогичного водосбору-мишени бассейна, набор откалиброванных по наблюдениям за речным стоком модельных параметров переносится на условно неизученный водосбор, находящийся в идентичных условиях. Однако аналоги не могут во всех отношениях соответствовать прогнозируемым объектам, поэтому прогноз, составленный на их основе, является приближенным.

Регрессионные методы основаны на моделях формирования стока, использующих всю возможную информацию (гидрологическую, метеорологическую, агрофизическую, водно-физическую информацию, о характеристиках гидрографической сети, рельефа, почв и пр.). Регрессионный анализ заключается в выявлении функциональной зависимости среднего значения одной величины от одной или нескольких переменных [47].

Позволяют установить связь между природными характеристиками водосбора и модельными параметрами с последующим проектированием полученных зависимостей на необеспеченные наблюдениями бассейны рек. Наиболее изученными являются методы с применением одиночной и

множественной линейной регрессии для связи ландшафтных и модельных параметров. Однако, также существуют множественные нелинейные регрессионные методы. Одним из таковых является построение искусственных нейронных сетей (ИНС), используемых для прогнозирования водных ресурсов.

Искусственные нейронные сети – метод статического моделирования, воспроизводящий сложнейшие параметрические зависимости. Все ИНС являются совокупностью двух типов элементов – нейронов и связей между ними (рисунок 1.6).

Нейроны представляют собой простые процессоры, вычислительные возможности которых ограничиваются некоторым правилом комбинирования входных сигналов и правилом активации, позволяющим вычислить выходной сигнал по совокупности входных сигналов. Выходной сигнал элемента посылается другим элементам по взвешенным связям, с каждой из которых связан весовой коэффициент, или вес. В зависимости от его значения передаваемый сигнал или усиливается, или подавляется.

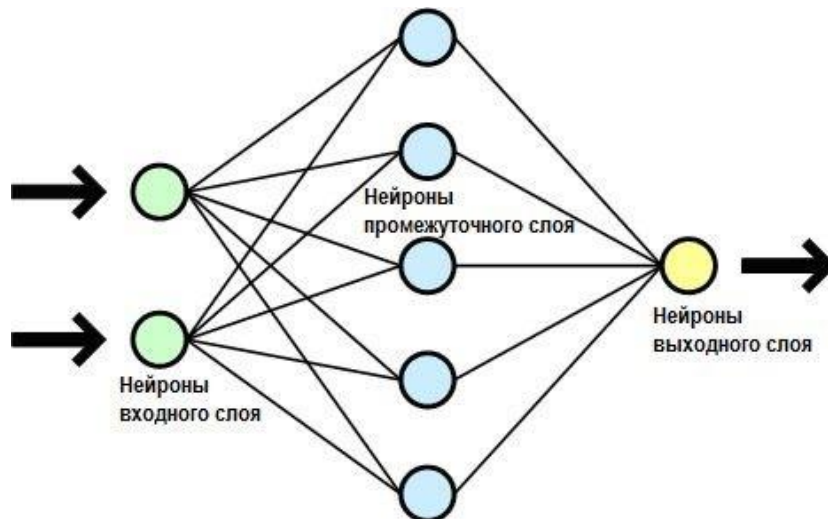


Рисунок 1.6 – Пример структуры нейронной сети

Программирование нейронных сетей заключается в их обучении, что является достоинством ИНС перед традиционными алгоритмами. Обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе

обучение ИНС способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, выполнять обобщения.

Успешно обученная сеть может воспроизводить верный результат на основании отсутствующих в обучающей выборке, неполных или частично искаженных данных. Это свойство характеризует адаптивность нейронных сетей к изменчивости окружающей среды [28]. Применение метода искусственных нейронных сетей для нахождения модельных параметров водосборов, неохваченных наблюдениями, позволяет формализовать соотношения между ландшафтными характеристиками.

Однако, методы расчета годового стока, основанные на моделях формирования стока, как правило, требуют очень большого объема гидрометеорологической, гидрофизической и другой информации по суточным интервалам времени, и часто дают неоправданно большие случайные погрешности определения годового стока, которые, как правило, даже превосходят погрешности расчета по сравнительно простым региональным зависимостям. Упрощение же этих методов нередко приводит к зависимостям годового стока от основных факторов [47].

Создание дополнительных наблюдательных постов расширило бы базу первичных данных, однако это не всегда возможно по экономическим показателям.

В настоящее время в ряде работ проведен сравнительный анализ рассмотренных методов определения расхода воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью [48, 49]. Исследователи пришли к выводу, что не существует одного универсального подхода и выбор метода моделирования гидрологических параметров речных бассейнов определяется характером водосбора, имеющимися в наличии данными и определяемыми характеристиками. Прогностические методы должны не только моделировать динамику водности рек, но и учитывать информацию о режимах

функционирования водной системы, влияние климатических и ландшафтных факторов.

Перспективным направлением исследований является комбинирование методов для повышения достоверности прогноза и учета пространственно-временной изменчивости гидрологических процессов [50].

Одним из таких подходов, объединяющих себе несколько методов определения расхода воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью является метод «корреляции карт», представляющий собой комбинацию методов пространственной интерполяции и физико-географического подобия.

1.3 Фрактальная размерность водных объектов, как интегральный показатель гидрографической сети (качества водных ресурсов)

Изучение природных условий в целях их рационального использования предполагает анализ разнородных пространственных данных, в том числе картографической информации с применением современных информационных технологий. Для раскрытия особенностей развития геосистем как во временном, так и пространственном отношениях, в условиях сложного строения ландшафтов, в последние десятилетия учеными стали привлекаться фрактальные методы анализа, позволяющие выявлять скрытую регулярность и упорядоченность геосистем [51].

Термин фрактал имеет несколько значений. Формальное или прямое объяснение математического фрактала – это система (ряд, цикл) для которых размерность Хаусдорфа (непрерывная функция) превышает топологическую размерность (дискретные функции). Топологическая размерность типична для Евклидовой геометрии: линия одномерная, плоскость - двумерная, куб трехмерный. Размерность D фрактальной след или путь, таким образом непрерывная функция с диапазоном $1 < D < 2$.

Полностью дифференцируемая система имеет фрактальную размерность $D=1$ (как и при топологической размерности), в то время как след броуновского движения частицы (который занимает все двумерное топологическое пространство) имеет фрактальную размерность $D=2$. Фрактальные величины между этими экстремумами количественно измеряют степень, до которой следы заполняют плоскость. Таким же образом фрактальные поверхности имеют величины $2 < D < 3$, с $D=2$ для абсолютно гладких поверхностей, $D=3$ для бесконечно складчатых. Фрактальный анализ позволяет обнаружить общие закономерности сложной динамики развития и структуры речной сети [51].

Речные сети (и в еще большей степени эрозионно-русловые сети) фрактальны в рамках определения Мандельброта, так как они самоподобны лишь в некотором смысле [52]. Это самоподобие выражается в сохранении древовидного рисунка при масштабировании, хотя структура этой древовидности может быть разной при разной степени разрешения изображения. Главное условие фрактальности объектов – неисчезающая сложность при увеличении масштаба – сохраняется для речных сетей Северной Евразии вплоть до водотоков длиной около 1 км. При дальнейшем увеличении масштаба речные сети не усложняются. Эрозионно-русловые сети сохраняют сложность при масштабировании вплоть до размера элементов в несколько сантиметров – отдельных струек воды. Если же включить в сеть водных потоков и гравитационные воды в системе макропор, пор и капилляров почвы, то сохранение сложности таких сетей происходит вплоть до размера отдельных элементов в доли миллиметра [53].

Речную сеть можно рассматривать как конечное звено определенного физико-географического процесса (процесса взаимодействия климатических, гидрологических и геоморфологических факторов), как вполне определенное отражение сложного физического процесса, протекающего на данном участке поверхности [54].

Фрактальный анализ - универсальный математический метод, позволяющий характеризовать большинство природных объектов и процессов. Общий методический подход к расчёту фрактальной размерности даёт возможность получать численное описание организации природных структур различного происхождения и сравнивать их между собой [55].

Математические фракталы являются абстракциями, но субъекты фрактального анализа, такие как цифровые изображения ограничены разрешением, как правило, не являются истинными фракталами в строгом смысле этого слова. Поэтому методы расчета фрактальной размерности для естественных фрактальных объектов имеют погрешности.

Фрактальную размерность можно рассматривать как интегральный показатель, характеризующий: степени извилистости рек, густоту речной сети и количество малых рек на водосборной территории.

Густота речной сети закономерно изменяется с изменением соотношения элементов водного баланса. Речная сеть в природе выполняет функцию отвода избытка поверхностных вод, густота речной сети является показателем степени обводненности территории. Следует отметить, что густота речной сети определяется не только климатическими условиями, важную роль играет геологическое строение и характер почво-грунтов, слагающих поверхность бассейнов. Помимо густоты речной сети, представляет интерес характер общего размещения рек в бассейне, т. е. рисунок речной сети. Последний, в отличие от густоты сети, в значительной мере связан с местными геологическими условиями.

Тем не менее, фрактальный анализ даёт возможность получать численное описание организации природных структур различного генезиса и, соответственно, сравнивать их между собой. Совместное использование классических методов, фрактальной геометрии и программы, облегчающей вычисление показателей фрактальной размерности с использованием геоинформационных технологий, представляет интерес с точки зрения

накопления потенциала фрактальной методологии и исследования взаимосвязи речной сети и структур рельефа [51].

В настоящий момент большинство публикаций о фрактальной размерности речных систем носят описательный характер и не имеют практического применения.

Установление связи между геолого-геоморфологическими характеристиками водосборного бассейна и фрактальной размерностью требует проработки методологической базы, для того, чтобы можно было взять за основу конкретное значение фрактальной размерности и использовать в качестве дополнительного источника атрибутивной информации о речной сети при построении геоинформационных систем. Этим обуславливается необходимость отработки методологии определения фрактальной размерности.

1.3.1 Методы исследования фрактальной размерности природных объектов

Обзор литературы показал, что фракталы нашли широкое применение в науках о Земле. Фрактальная теория применительно к водным объектам использовалась в различных целях: для определения показателя размерности при анализе природных объектов, таких как реки, водосборы и озера [56-67], овражные сети, поймы, для описания эрозионных процессов почвы [68, 69], для анализа изменения климатических показателей и гидрологических характеристик [70-72] и др.

Значения фрактальной размерности речных сетей могут определяться различными способами. В работе Чупиковой С.А. [51] сравнивались результаты расчетов фрактальной размерности речных систем Тывы, полученные тремя разными способами: соотношение длина - площадь, «box-counting» и метод на основе теории порядка. Установлено, что разница в результатах фрактальной

размерности для гидрографических сетей варьируется в диапазоне 4-8%, что говорит о взаимозаменяемости используемых методов.

В таблице 1.1 приведено обобщение основных методов определения фрактальной размерности природных объектов, которые используются современными исследователями. Для краткости математические выводы целенаправленно исключены из описания. Однако, важно отметить, что многие методы измерения фрактальной размерности D выведены эмпирически и основываются на степенном законе [52, 73]. Существующие методы дают основу для формирования новых.

Таблица 1.1 - Применение методов, использованных для определения фрактальной размерности линейных объектов [74, 75]

Метод	Применение	Ссылка
Метод делителя	используемые физические разделители для измерения потоков лавы	Bruno et al. 1992 [76]
	оцифрованные контуры	Culling and Datko, 1987 [77]
	оцифрованные береговые линии и контуры	Goodchild, 1982 [78]
	оцифрованные береговые линии	Kent and Wong, 1982 [79]
	линия скелетов пещерных коридоров контуров	Laverty 1987 [80]
	периметры водосбора	Breyer and Snow, 1992 [81]
	фрактальная размерность корневых систем.	Fitter and Strickland (1992) [82]
	береговая зона озер периода докембрия. Канада.	Kent and Wong (1982) [79]
	размер ареала белоголового орлана, измеренная D береговых линий Аляски.	Pennycuick and Kline (1986) [83]
	D для листьев контуров пород деревьев.	Vlcek and Cheung (1986) [84]
	австралийские коралловые рифы. вариация в D с пространственным масштабом.	Bradbury et al. (1983,1984) [85, 86]
	фрактальный анализ извилистости рек (на примере томской области)	Мельник, 2009 [57]
Box counting	оцифрованные береговые линии и контуры	Goodchild, 1982 [78]
	фотографии растительности	Morse et al., 1985 [87]
	речные сети, извлеченные из цифровой	Tunas G, Anwar N, Lasminto

Метод	Применение	Ссылка
	модели рельефа	U [88]
	модели трещиноватости определяется с удаленных изображений	Vignes-Adler et al., 1991 [89]
	отношение размер-численность в популяциях пауков	(Gunnarsson (1992) [90]
	расселение видов беспозвоночных, искусственные субстраты различной D.	Jeffries (1993) [91]
	отношение размер-численность популяции членистоногих, на основе D среды обитания	Morse et al. (1985) [87]
	отношение размер-численность популяции членистоногих, в талломах лишайников	Shorrocks et al. (1991) [92]
	фрактальная размерность систем корней культурных растений.	Tatsmui et al (1989) [93]
	диапазоны расселения видов птиц в Финляндии	Virkkala (1993) [94]
	сложность ландшафта пастбищ в масштабе, населяющих их видов жуков	Wien and Milne (1989) [95]
	фрактальная размерность речных систем Тувы	Чупикова, 2010 [51]
	оцифрованные береговые линии и контуры	Goodchild, 1982, Kent and Wong, 1982 [78, 79]
Зависимость длины водотока площади/ периметра от	цифровые изображения облаков	Lovejoy, 1982 [96]
	цифровые изображения кратеров на марсе	Woronow, 1981 [97]
	периметр карстовой воронки	Reams, 1992 [98]
	масштаб ландшафта, участки лиственных лесов в Луизиане, Миссисипи.	Krummel et al. (1987) [99]
	D крупных ландшафтных единиц, восточного побережья и среднего запада США	O'Neill et al. (1988) [100]
	участки ландшафта аэрофотоснимки (1930-1980) Джорджия.	Turner and Ruscher (1988) [101]
Спектральная плотность	природные поверхности скал	Brown and Scholz, 1985 [102]
	цифровая модель дна моря	Fox and Hayes, 1985 [103]
	природные поверхности скал	Power et al., 1987 [104]
	оцифрованные следы разломов	Scholz and Aviles, 1986 [105]
Метод вариограммы	различные геофизические явления	Burrough, 1981, 1984 [106, 107]
	почвенные профили	Burrough, 1984 [107]

Метод	Применение	Ссылка
	pH почвы	Culling, 1986 [108]
	оцифрованные карты	Culling and Datko, 1987 [77]
	цифровая модель рельефа	Klinkenberga and Goodchild, 1992 [109]
	профили высоты ледникового покрова, полученные из данных Landsat	Rees, 1992 [110]
Вероятностная плотность	D почвенных областей без растительности, в пастбищах, для моделирования фрагментации среды обитания.	Milne (1988, 1991, 1992) [111-113]
Распределение частот	таксономические системы.	Burlando (1990) [114]
	D и H (гипергеометрический) лесных участков.	Hastings et al. (1982) [115]
	распределение размеров семян у разных видов.	Hegde et al. (1991) [116]
	D и H (гипергеометрический) из выпасаемых областей с течением времени, Зимбабве.	Meltzer and Hastings (1992) [117]
	распределение частиц по размерам, различные почвы	Tyler and Wheatcraft (1989) [118]
Пространственные временные ряды	D ландшафтов и других данных об окружающей среде.	Burrough (1981) [106]
	вариограмма D, почвенные данные вдоль разрезов.	Burrough (1983) [119]
	вариограмма D. разрезы в растительных сообществах.	Palmer (1988) [120]
	вариограмма D, экологический градиент эрозии береговой линии	Phillips (1985) [121]
Точечный график	подсчеты микросферы сердца бабуина: моделирования.	King et al. (1990) [122]
	эпицентры землетрясений в Японии: симуляции	Ogata and Katsura (1991) [123]
Поверхностные модели	масштабная зависимость рельефа и растительности, штат Монтана.	Bian and Walsh (1993) [124]
	рельеф поверхности, штат Аризона.	Huang and Turcotte (1989) [125]
	топографии поверхности. цифровая модель рельефа, Колумбия.	Polidori et al. (1991) [126]
Метод треугольной призмы	D цифровой модели рельефа (ЦМР), цифровые изображения объектов на земле, полученные воздушной и спутниковой съемкой	Lindi J. Quackenbush (2005) [75]
Теория порядка рек	определение D водосборного бассейна, на основе соотношения рек с длинами разного диапазона	Сидорчук А.Ю. 2014 [53]

Для выбора подходящего способа необходимо учитывать тип исследуемого объекта. Одни методы определения фрактальной размерности могут работать с объектами любого типа, в то время как другие должны применяться только к самоподобным объектам или самоподобным на ограниченном (конечном) диапазоне масштабов.

Интерпретация измерений, полученных различными методами, также требует тщательного рассмотрения в нескольких аспектах: таких, как разница между «теоретическими» ожиданиям и фактическим значением, является результатом применения метода (т.е. практической реализации) или выбранной фрактальной модели [127–129]. Иными словами, правильно ли выбран метод и используется ли он надлежащим образом.

Как видно из таблицы 1.1 для анализа разветвленных речных сетей применяется метод box-counting. До начала его применения в исследованиях фракталов, метод box-counting в основном использовался для быстрого определения площади географических объектов на карте [130, 131].

Этот способ может быть использован для определения фрактальной размерности кривых на плоскости [132]. Однако в дополнении он может быть применен и к более сложным кривым и другим структурам лишенным (или с неявным) самоподобием [133]. Практическая реализация метода заключается в наложении стандартной (обычной) сетки, с размером ячейки δ на объект и расчета количества пикселей (N) которое покрывает объект. Далее процесс повторяется для меньшего δ , при условии, что $\delta \rightarrow 0$. Этот порядок действий повторяется с использованием разных значений δ [120].

$$N(\delta) = \frac{1}{\delta^D} \quad (1.1)$$

В таком случае фрактальная размерность D кривой определяется как угловой коэффициент графика, $\log N(\delta)$ как функции от $\log \delta$ [134].

Longley и Batty [132] писали, что этот метод может быть менее подходит к задаче охвата наиболее сложных деталей основных (базовых) кривых, по причине низких требований метода к вычислительным мощностям, рекомендуется как

метод подходящий для получения первого приближения к фрактальной размерности.

Метод box-counting может использоваться и для объемных объектов. Morse и др. [87] описывали алгоритм, основанный на методе box-counting, для измерения фрактальной размерности экологических ареалов ($2 < D < 3$), где размерность определялась путем подсчета измерительных кубов (counting cubes).

При стандартной реализацией метода box-counting были выявлены некоторые проблемы. Так как небольшой сдвиг расчетной сетки может вызвать разные величины N для заданных δ , то для снижения ошибки необходимо использовать разное расположение сетки (рисунок 1.7).

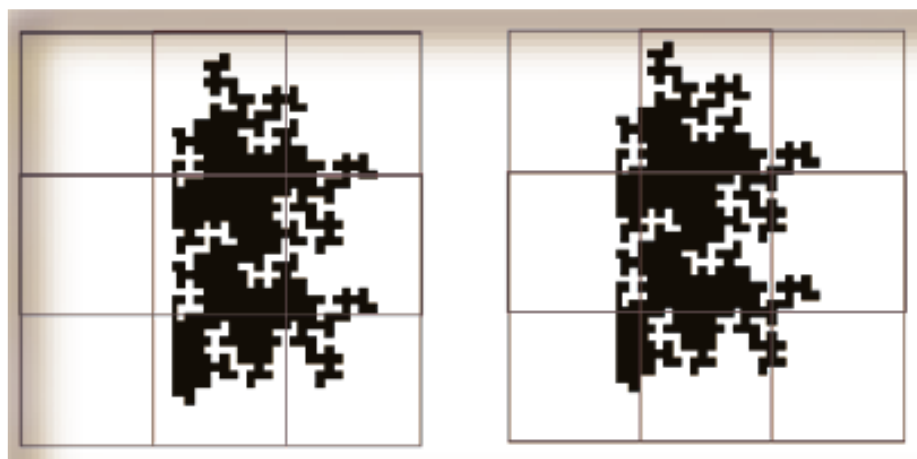


Рисунок 1.7 - Зависимость количества заполненных изображением квадратов, от положения сетки

Метод требует значительного объема памяти компьютера и времени вычислений, так как требуется сохранение большого количества ячеек. Поэтому Liebovitch and Toth [135] ввели "быстрый" алгоритм, в котором, используется подход, основанный на статистической выборке и не требующий полного перебора каждой клетки на более высоких разрешениях.

Box-counting также требует большого количества точек данных, для получения правильного значения размерности. Dubuc et al. [97] сообщили о неустойчивости метода при малом количестве ячеек.

Был рассмотрен вопрос об определении минимального и максимального размеров ячейки. Liebovitch and Toth [135] предложили не учитывать первые две итерации (когда используется один и четыре квадрата) и также исключить последний слой, когда размер ячейки приближается к разрешению данных (каждая точка данных заполняет одну ячейку).

Dubuc et al. [128] выявили проблемы, связанные с устойчивостью угла наклона двойного логарифмического графика, когда большие размеры квадрата были включены в анализ. Как и с любым другим методом, который определяет наклон в двойном логарифмическом пространстве, размеры ячеек должны изменяться в зависимости от степени числа два (2^n), так чтобы они были равномерно разнесены в логарифмическом пространстве. Dubuc et al. [128] обнаружил, что удваивание каждой ячейки приводит к сокращению количества итераций, а, следовательно, и точек для построения графика и отказался от этого принципа.

Некоторые авторы полагают, что на качество фрактального анализа влияет форма анализируемого изображения. Некоторые авторы предлагают первое отображение исходных данных должно быть на квадратном участке, а форма отличная от квадрата может внести погрешности при дальнейших итерациях. По данной проблеме существует недостаточное число публикаций. Lovejoy [96] представил подробное обсуждение метода «box-counting» и предположил, что ячейки не должны быть квадратными. Например, при использовании прямоугольных клеток, могут быть изучены неизотропные, многомерные фракталы.

Еще одной особенностью метода, способной отразиться на конечном результате, является влияние субъективного фактора при ручном подсчете заполненных изображением ячеек. Если изображение находится на границе квадратов, то вопрос покрытия или не покрытия их остаются за исследователем, осуществляющим расчет.

Наряду с возможностями метода, существуют некоторые ограничения. Ниже приведены некоторые проблемы, с которыми столкнулись исследователи при реализации метода.

1. Регрессионный анализа для оценки D. Большинство методов расчета фрактальной размерности основываются на степенном законе и поэтому используют регрессионный уклон двойного логарифмического графика, для определения D. Предполагаемый наклон (и D) будет зависеть от того, какой показатель определяется как "зависимая" переменная. Выбор не всегда прост. При вычислении значения периметра, например, Burrough [136] (1986) использует степенное отношение $A = kP^{2/D}$ ($\log A$ vs. $\log P$, $D = \text{угол наклона}/2$), тогда как Lovejoy [96] строит график $\log P$ и $\log A$ ($D = \text{двойной уклон}$).

2. Краевые эффекты и карты. Эта проблема, которая не обсуждалась в литературе, относится в частности к методам «площадь-периметр» и функции плотности вероятности. Для метода «площадь-периметр» включающего «островки», примыкающие к краю исследуемой области, приводит к необъективной оценке фрактальной размерности. Самое простое решение - игнорировать эти острова, но это, весьма вероятно, приведет к исключению большей доли крупных островов (которые также могут исказить оценку D).

3. Ориентация. На цифровых изображениях (растровых картах), линия, проведенная под 45° к горизонтали аппроксимируется в виде «лестницы». Это приводит к «увеличению» периметра объекта относительно к его площади, и как следствие-к необъективной оценке D, когда используются методы «площадь – периметр».

4. Размер исследуемого изображения. Эта проблема (специфичная для метода «площадь-периметр») обсуждалась Milne [112]. Он отметил, что когда, теоретически, фрактальная размерность находится в диапазоне $1 < D < 2$ эти пределы не достигаются в случае небольших изображений (около 30 пикселей). Для очень маленьких это смещение является значительным. Преобладание мелких

изображений показывает, что для расчета фрактальной размерности требуется более подробная карта.

5. Разрешение. Измерение фрактальной размерности требует, чтобы фрактальная структура была выражена в евклидовом пространстве с помощью евклидовой геометрии (карта, оцифрованная фотография, пространственные ряды). Парадокс заключается в том, что оценка фрактальной размерности объекта базируется на евклидовом выражении этого объекта. Мелкие структуры объекта теряются во время уменьшения масштаба. Разрешение карты ограничено картографическим приближением. Результаты этого парадокса не достаточно оцениваются. Для метода «делителя» и близких техник уменьшение длины измерителя будет иметь тенденцию к недооцениванию фрактальной размерности по причине ограниченности самого анализируемого изображения.

Kent and Wong [79] установили, что фрактальная размерность озёр была ниже на более мелких пространственных масштабах. Они сделали вывод, что различные процессы действуют в разных масштабах. Однако, предварительные исследования [136] показали, что это изменение фрактальной размерности с масштабом может быть артефактом ограниченного разрешения изображения. На основе проведенных исследований установлено, что для речных сетей наиболее подходящим методом определения фрактальной размерности является box-counting.

Ввиду отсутствия единой методики по определению фрактальной размерности, разные исследователи пользуются различными методиками и картами различных масштабов для расчета фрактальной размерности гидрографических сетей. И как следствие, получают различные значения фрактальной размерности, которые не могут быть сопоставлены друг с другом.

1.4 Управление рисками водных ресурсов на территории. Построение системы поддержки принятия решений в управлении водными ресурсами

Возникновение городских поселений исторически обусловлено наличием рек на территории. Водные экосистемы и особенно малые реки подвергаются наиболее интенсивному антропогенному загрязнению, вследствие чего резко ухудшается качество воды. Загрязняющие вещества попадают в водоемы и водотоки, в основном, со сточными водами промышленного и сельскохозяйственного производства, а также коммунального и бытового хозяйства. Особенно сильно загрязняются малые и средние водотоки, находящиеся в промышленных и густонаселенных районах. Изменению качества воды в реках в следствии возрастающей антропогенной нагрузки посвящены следующие работы [2, 137-140]. Ввиду интенсификации процессов урбанизации и государственной поддержки развития малозаселенных территорий Российской Федерации особенно важным становится вопрос об управлении качеством водных ресурсов водосборных территорий с недостаточной гидрологической изученностью.

Проблеме оценке рисков при управлении водными ресурсами посвящены следующие работы:

Специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата МГЭИК (2012). Управление рисками экстремальных явлений и стихийных бедствий для содействия адаптации к изменению климата. Специальный доклад рабочих групп I и II Межправительственной группы экспертов по изменению климата [141].

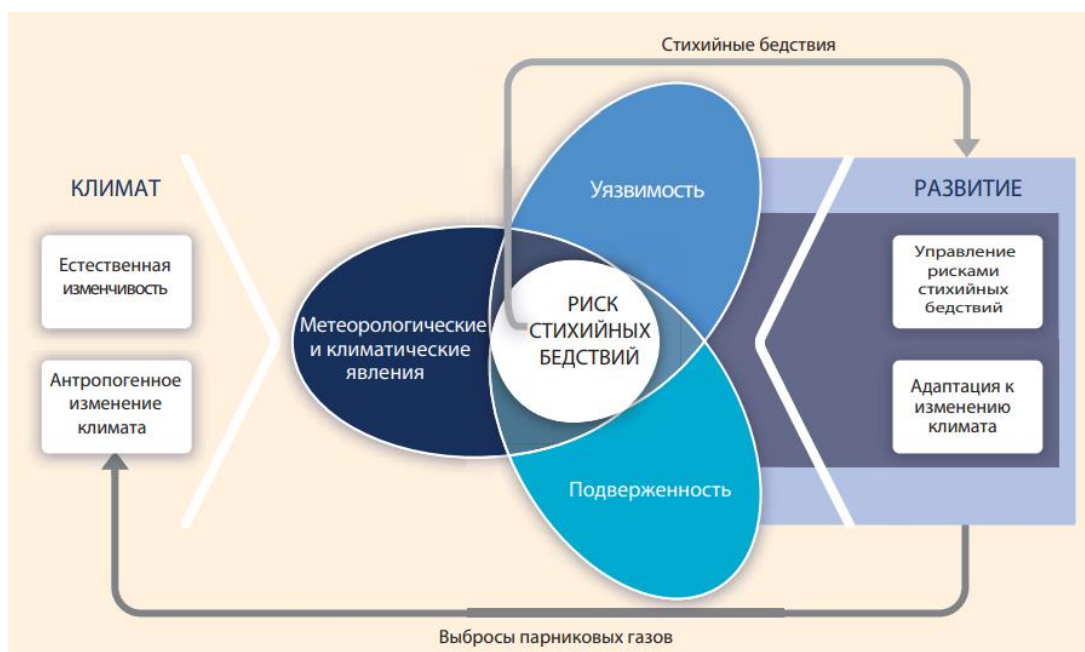


Рисунок 1.8 – Концепция риска МГЭИК 2012 [141]

Концепция риска, позаимствованная из докладов МГЭИК (рисунок 1.8), подчеркивает взаимосвязь между угрозой, подверженностью и уязвимостью, являющимися компонентами риска [141]. Характер и серьезность последствий экстремальных климатических явлений зависит не только от самих этих явлений, но также и от подверженности и уязвимости. В настоящем докладе неблагоприятные последствия считаются бедствиями в тех случаях, когда они вызывают широкомасштабный ущерб и приводят к резким изменениям в нормальном функционировании каких-либо сообществ или общества в целом. На климатические экстремальные явления, подверженность и уязвимость влияет широкий спектр факторов, включая изменение климата в результате деятельности человека, естественную изменчивость климата и социально-экономическое развитие [141].

В работе [142] приведена оценка риска загрязнения водных объектов при разливе нефтепродуктов базирующаяся на бальной оценке, определяемой по ряду показателей (факторов) степени риска.

На ряду с экспертной оценкой выделяются еще два основных метода оценки вероятности проявления экологических рисков [143]:

- статистический, основанный на анализе накопленных статистических данных по различным факторам экологической опасности, реализовавшихся на объектах аналогичного вида деятельности или связанных с природными процессами, проявившимися на территории данного региона в прошлом;

- аналитический, базирующийся на изучении причинно-следственных связей в природно-антропогенной системе конкретной территории, позволяющий оценить вероятность проявления фактора экологической опасности как сложного явления, образованного сочетанием последовательности элементарных событий с известными вероятностями их проявления.

Современные направления устойчивого развития предполагают переход от концепции «реагировать на угрозы и исправлять» к концепции «предвидеть и предупреждать». Реализация такого подхода к управлению требует выявления опасностей (угроз) развитию территориальных систем, оценку риска управленческих решений и формирование системы геоинформационного управления рисками развития систем различного масштаба и сложности [144].

В настоящей работе расчет геоэкологического риска истощения и загрязнения водных ресурсов основывается на способе определению риска длительного (хронического) воздействия, разработанного Международным институтом оценки риска здоровью (А. В. Киселев, К. Б. Фридман) [18]. Данный подход к расчету риска адаптирован к отечественным нормативам и применим для различных составляющих окружающей среды (воздух, питьевая вода и т.д.). На основе работ [2, 18] средневзвешенный геоэкологический риск рассчитывался по формуле 1:

$$Risk_{cp} = 1 - \exp \frac{1}{2} \{ l_n(1 - Risk_{ист}) + l_n(1 - Risk_{загр}) \} \quad (1)$$

где $Risk_{ист}$, $Risk_{загр}$ — показатели риска истощения и загрязнения соответственно.

Ранжирование риска происходило в соответствии с данными в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Ранжирование значений риска

Величина средневзвешенного риска $Risk_{cp}$	Характеристика риска
0,00–0,25	Слабый
0,25–0,50	Средний
0,50–0,75	Сильный
0,75–1,00	Очень сильный

Риск истощения определялся по формуле 2

$$Risk_{ист} = 1 - \exp\{\ln(0.84) \cdot K_{ист} \cdot K_{п}\} \quad (2)$$

Коэффициент истощения определялся по соотношению 3

$$K_{ист} = \frac{V_{пов} + V_{под}}{Q_{год\ ст} \cdot S_{вдс} \cdot K_{исп}} \quad (3)$$

где $V_{пов}$ – водоотбор поверхностных вод, тыс. м³/км²;

$V_{под}$ – водоотбор подземных вод, тыс. м³/км²;

$Q_{год\ ст}$ – среднегодовое количество стока, м³/с;

$S_{вдс}$ – действующая площадь водосборов, км²;

$K_{исп}$ – поправочный коэффициент в зависимости от типов почв и видов землепользования.

Риск загрязнения определялся по формуле 4

$$Risk_{загр} = 1 - \exp\{\ln(0.84) \cdot УКИЗВ \cdot K_з \cdot K_{зап}\} \quad (4)$$

где УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков [145]

$K_{зап}$ – коэффициент запаса, принимаемый равным 10;

$K_з$ – коэффициент загрязнения

На всех этапах планирования и управления водохозяйственной и водоохранной деятельностью действенным инструментом принятия решений является регламентация водопользования и сброса сточных вод. Нормативы допустимых сбросов загрязняющих веществ в составе сточных вод определяются исходя из оценки антропогенной нагрузки на водный объект или его участок. При этом, обоснование допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе

сточных вод осуществляется согласно специальным нормативным документам, основанным на анализе реально сложившихся условий в створе выпуска сточных вод одного рассматриваемого водопользователя [146]. Однако, современная система нормирования не учитывает особенностей водного объекта как экосистемы [147].

Главной целью нормирования водопотребления является охрана природных ресурсов без необоснованных ограничений полезной экономической деятельности. Очевидно, что разрабатываемые нормативы изъятия ресурсов и допустимых воздействий создают условия для определенных сценариев экономического развития. Ужесточение нормативов создаст препятствия для масштабной хозяйственной деятельности, ослабление приведет к утрате природно-ресурсного потенциала. Конкурентные отношения, возникающие при необходимости распределения ограниченных природных ресурсов, способны значительно повысить их цену [148].

Таким образом, возникает необходимость тщательного обоснования и нормативов изъятия различных ресурсов, и нормативов использования ассимилирующего потенциала окружающей среды (предотвращения количественного и качественного истощения).

В то же время высокие требования к экологическому состоянию водной среды региона выступают сдерживающим фактором интенсификации хозяйственной деятельности, что не лучшим образом отражается на развитии территории. Такое двоякое положение обуславливает необходимость повышения эффективности управления водными ресурсами. В этой связи оценка устойчивости поверхностных вод к внешним воздействиям и внутренним изменениям, разработка системы поддержки принятия решения при управлении водными ресурсами и определение мероприятий по минимизации рисков истощения и загрязнения воды становятся особенно важными [149].

Результаты и выводы по главе 1

1. В первой главе изучено применение геоинформационных систем для принятия решений по управлению водными ресурсами. Анализ литературных источников показал, что использование информационных систем и разнородных пространственных данных позволяет решить проблему дефицита и риска истощения водных ресурсов. В настоящий момент данные, необходимые для управления водными ресурсами, собираются различными организациями и ведомствами в различных форматах, что усложняет их использование ввиду несовместимости баз данных. Еще одним затруднением в разработке систем поддержки принятия решений для административно - территориальных единиц является применение бассейнового подхода, когда все характеристики рассчитываются для водосборной территории. Поэтому существует необходимость в создании баз данных характеристик (гидрологических, гидрохимических, изображения гидрографической сети в различных масштабах) исследуемой водосборной территории и разработки геоинформационной системы для поддержки принятия решений при управлении рисками истощения и загрязнения водосборной территории на основе разнородной пространственной информации.

2. Установлено, что при управлении водными ресурсами возникает проблема недостатка данных гидрологических характеристик, в частности расходов воды в реках. Рассмотрены современные подходы к моделированию расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью. Результаты исследования показали, что не существует одного универсального метода моделирования гидрологических параметров речных бассейна. Для повышения достоверности предложено использовать комбинирование методов пространственной интерполяции и физико-географического подобия.

3. Результаты исследования фрактальной размерности речных сетей подтвердили гипотезу о том, что она является интегральным показателем, характеризующим степень извилистости рек, густоту речной сети и количество малых рек водосборной территории. Значение фрактальной размерности дает возможность получить численное описание организации природных структур различного происхождения, которое может быть использовано в качестве дополнительного источника атрибутивной информации о речной сети при построении геоинформационных систем. Раскрыта проблема применения значений фрактальной размерности на практике, связанная с отсутствием единого подхода к ее расчету.

Глава 2 Характеристика объекта исследования, исходные данные и методы исследования

Объектом исследования является геоинформационная система обработки разнородных пространственных данных (на примере водосборной территории р. Уфа). Уфа - река III порядка Волжского бассейна водосборная площадь которой располагается в пределах четырёх субъектов РФ: Пермской, Свердловской, Челябинской областей и Республики Башкортостан (РБ), самый крупный правосторонний приток р. Белая (рисунок 2.1). На территории водосбора есть и горные и равнинные участки рельефа. Гидрографическая сеть бассейна р. Уфа насчитывает более 5000 водотоков разной длины. Рассмотрены притоки р. Уфа: р. Бисерть, р. Ай (с притоками р. Большой Ик, р. Киги, р. Большая Арша, р. Куса, р. Тесьма), р. Юрюзань (с притоками р. Тюлюк и р. Катав), р. Тюй (с притоком р. Сарс), р. Яманелга. С р. Уфа связана деятельность жилищно-коммунального хозяйства населенных пунктов, расположенных на территории бассейна реки. Река Уфа является источником питьевого водоснабжения для нескольких населенных пунктов и городов, самым крупным из которых является столица Республики Башкортостан г. Уфа [150].

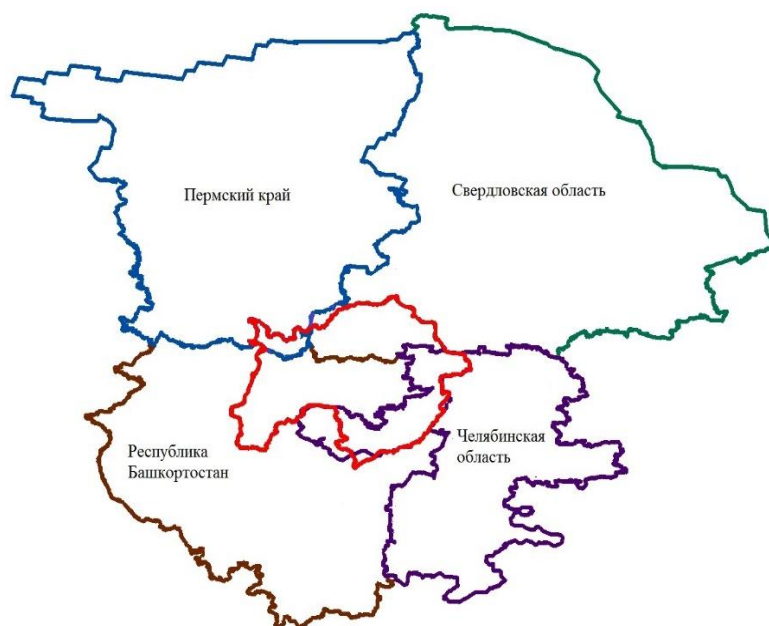


Рисунок 2.1 - Расположение водосборного бассейна р. Уфа

2.1 Общая характеристика исходных данных

В качестве исходных данных в работе использовалась:

- гидрологическая и гидрохимическая информация с гидрологических створов, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфа за многолетний период;
- пространственные данные;
- демографические данные: население субъектов РФ, в которых расположен водосборный бассейн р. Уфа на 1 января 2020 г. [151].

2.1.1. Гидрологические и гидрохимические данные

В работе использованы гидрологические и гидрохимические показатели р. Уфа. Расположение исследуемых створов отмечено на карте – схеме рисунок 2.2. Данные о створах наблюдения представлены в таблицах 2.1 - 2.2.

- гидрологические: по 25 створам, расположенным в пределах всей водосборной территории р. Уфа. Период исследования 1963-1987 гг. Проанализировано более 197 000 ежедневных данных о расходе, опубликованных в Гидрологических ежегодниках Уральского управления гидрометеорологической службы [152].

- гидрохимические: по 10 створам, расположенным на территории республики Башкортостан. Период исследования с 1991-2000 гг. Проанализированы результаты химического анализа более чем 13700 ежемесячных проб воды, опубликованные в материалах Государственного водного кадастра за период 1991-2000 гг. [153]. Оценка качества речной воды проведена по 18 показателям: растворенный кислород, насыщаемость кислородом (%), биологическое потребление кислорода (БПК₅), химическое потребление кислорода (ХПК), сульфаты, фенол, фосфаты, хлориды, суммарный азот

($\text{NH}_4+\text{NO}_2+\text{NO}_3$), азот аммонийный, нитрит азота, нитрат азота, углекислый газ, фосфор, железо общее, минерализация, марганец, нефтепродукты.

Таблица 2.1 – Обозначение и координаты гидрологических постов [154]

№	Название поста	Условное обозначение	Период наблюдения	Координаты истока	
				с. ш.	в. д.
1	р. Уфа - г. Нязепетровск	UN	1963-1987	56.0177792	59.5710254
2	р. Уфа - г. Михайловск	UM	1966-1969, 1971, 1974-1987	56.4135037	59.09356
3	р. Уфа - г. Красноуфимск	UK	1963-1987	56.6117057	57.7851677
4	р. Уфа - с. Верхний Суян	UV	1966-1987	56.041017	57.268286
5	р. Уфа -Павловская ГЭС, нижний бьеф	UP	1963-1987	55.402669	56.539274
6	р. Ай - с. Веселовка	AV	1966-1987	54.9631954	59.5368755
7	р. Ай - с. Метели	AM	1963-1987	56.024441	57.940356
8	р. Ай – г. Златоуст	AZ	1963-1979	55.189425	59.6221375
9	р. Ай - с. Лаклы	AL	1963-1987	55.198056	58.55
10	р. Юрюзань – пгт. Вязовая	JV	1966-1987	54.9028291	58.3402723
11	р. Юрюзань - д. Чулпан	JC	1963-1987	55.292680	58.121381
12	р. Юрюзань - пос. Атнаш	JA	1963-1987	55.577784	57.216100
13	р. Юрюзань- с. Екатериновка	JE	1963-1979, 1982	54.7364652	58.5063922
14	р. Юрюзань- ж. д ст. Юрюзань	JJ	1966-1974	54.447	58.444
15	р. Бисерть - с. Гайны	BG	1963-1987	56.7194801	58.033551
16	р. Тесьма - г. Златоуст	TZ	1963-1987	55.1902725	59.7238979
17	р. Куса - пгт Магнитка	KM	1965-1987	55.3402995	59.6837425
18	р. Большая Арша - д. Вознесенская	BA	1963-1987	55.5363296	59.6263862
19	р. Тюй - д. Гумбино	TG	1963-1987	55.999129	57.043472
20	р. Сарс - с. Султанбеково	SS	1963-1987	56.035585	57.140668
21	р. Тюлюк - с. Тюлюк	TT	1965-1987	54.618	58.771
22	р. Яманелга - выше ист. Тюба (Устье)	YE	1971-1986	55.4312415	56.6235352
23	р. Киги - д. Кондаковка	KK	1980-1987	55.6023084	58.4874451
24	р. Большой Ик - д. Таишево	BI	1963-1987	55.756634	58.442949
25	р. Катав - Верхний Катав	VK	1966-1987	54.6163437	58.286376
26	р. Уфа – г. Уфа	UU	-	54.677	55.99
27	р. Шугуровка – г.Уфа	ShU	-	54.788	56.168

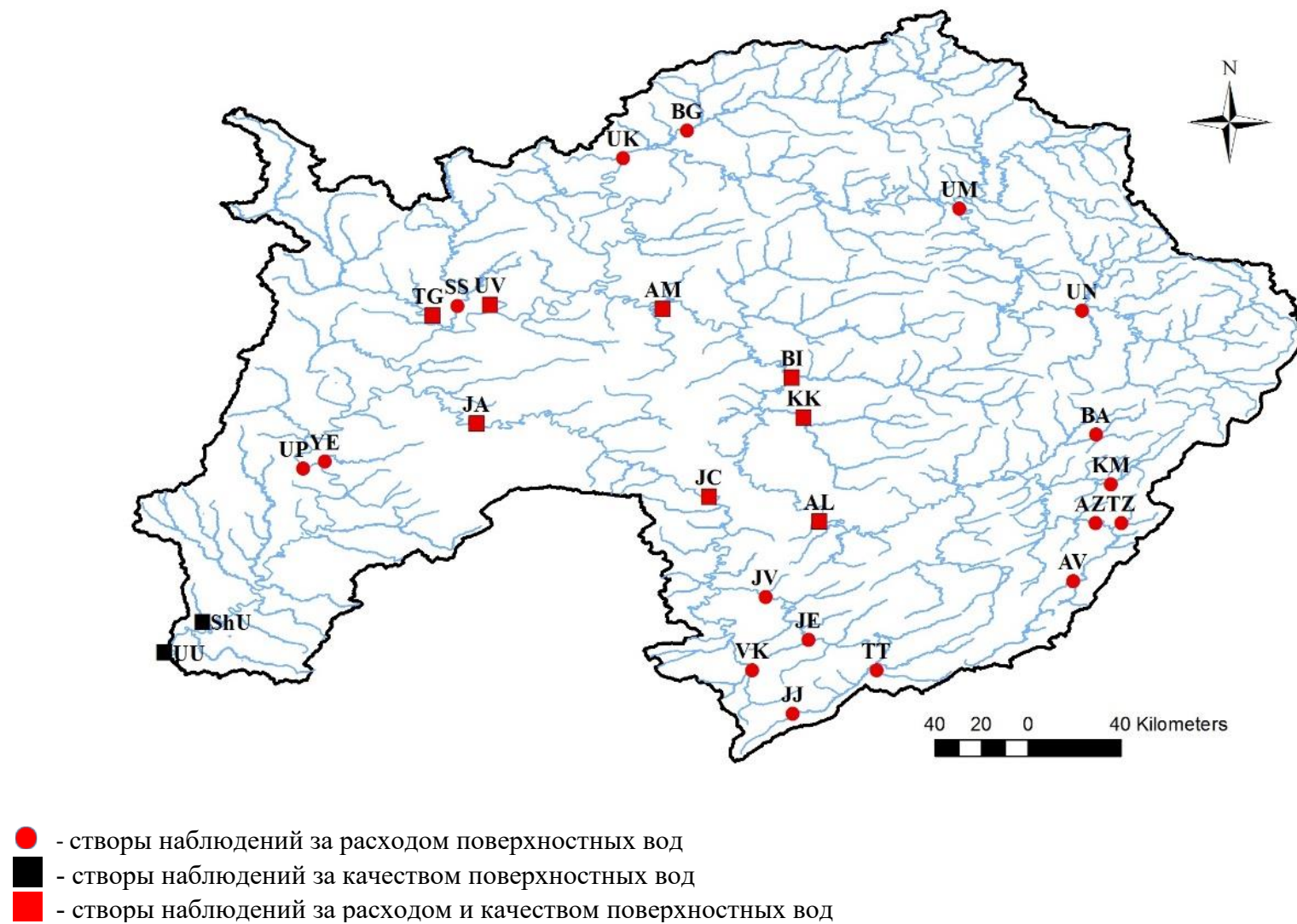


Рисунок 2.2 – Карта – схема наблюдательной сети на территории водосборного бассейна р. Уфа

Таблица 2.2 – Характеристика пунктов наблюдения водотоков бассейна р. Уфа [155, 156]

№ п/п	Река	Пункт наблюдений	А, км ²	Р, км	Н, м	Л, км	Коэф. извилис т.	Зака рст., %	φ	Заболоченность	Лесистость	Распаханность
1*	р. Уфа	д. Верхний Суян	32400	1146	363	918	3,19		0,59	2	58	
2	р. Уфа	Павловская ГЭС	47100	1521	370	918	2,67			1	58	
3	р. Уфа	г. Нязепетровск	3560	425	432	918	1,97	4	0,49			
4	р. Уфа	г. Михайловск	5650	503	408	918	2,23	24	0,50			
5	р. Уфа	г. Красноуфимск	14200	830	368	918	2,19	15	0,55			
6*	р. Юрюзань	д. Чулпан	4850	484	586	404	2,14			1	65	
7*	р. Юрюзань	п. Аtnяш	6930	672	521	404	2,19	35	0,59	2	64	
8	р. Юрюзань	пгт Вязовая	2430	335	681	404	2,08					
9	р. Юрюзань	с. Екатериновка	1740	290	763	404	2,07	10	0,50			
10	р. Юрюзань	ж. д ст. Юрюзань	166	66	954	404	1,08					
11*	р. Ай	с. Лаклы	6440	493	527	549	3,99	24	0,56	1	73	
12*	р. Ай	с. Метели	14200	766	457	549	2,96	44	0,59	1	48	
13	р. Ай	с. Веселовка	586	142	700	549	1,41					
14	р. Ай	г. Златоуст	1120	235	669	549	1,59		0,52			
15*	р. Тюй	д. Гумбино	2180	380	229	193	1,74	55	0,59	0	57	10
16	р. Сарс	с.	1300	233	303	135	1,89	70	0,74	0	66	4

№ п/п	Река	Пункт наблюдений	А, км ²	Р, км	Н, м	L, км	Коэф. извилис т.	Зака рст., %	φ	Заболоченность	Лесистость	Распаханность
		Султанбеково										
17*	р. Большой Ик	д. Таишево	1450	212	346	108	1,80			1	42	26
18*	р. Киги	д. Кондаковка	1240	185	350	87	2,29					
19	р. Бисерть	с. Гайны	3150	325	322	193	2,08	0	0,56			
20	р. Тесьма	г. Златоуст	143	56	668	18	1,08	0	0,49			
21	р. Куса	пгт. Магнитка	287	86	535	59	1,15					
22	р. Большая Арша	д. Вознесенская	277	91	491	56	1,33	0	0,42			
23	р. Тюлюк	с. Тюлюк	136	70	830	25	1,26					
24	р. Яманелга	(Устье)	718	186	354	47	1,92	100	0,51			
25	р. Катав	п. Верхний Катав	333	107	668	95	0,89					
26*	р. Уфа	г. Уфа										
27*	р. Шугуровка	г. Уфа										

* - размещение пункта наблюдения качества воды на реках, совпадает с гидрологическим постом

** - пункты наблюдения качества воды, расположенные отдельно от гидрологических постов

φ- Коэффициент внутригодовой зарегулированности стока.

Выбор створов и периодов исследования обусловлен полнотой и доступностью исходной информации.

2.1.2 Пространственные данные

Для выполнения расчетов, проведения фрактального анализа и визуального представления информации в настоящем исследовании использованы пространственные данные:

- карты геологической структуры Всероссийского научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского [157];
- топографические карты исследуемой территории в пяти масштабах: 1:2000000, 1:1000000, 1:500000, 1:200000 и 1:100000 [158];
- цифровая модель рельефа (ЦМР) построенная на основе SRTM (Shuttle radar topographic mission) [159];
- электронная карта РФ (открытый ресурс Open Street Map) [160].



Рисунок 2.3 -Исходные данные для построения геоинформационной систем управления рисками загрязнения и истощения на водосборе р. Уфа

На рисунке 2.3 представлена систематизация исходной информации и ее распределение по базам данных. В качестве программного обеспечения для обработки и визуализации геоданных используются программы ArcGis 10.1 и QGIS. В целях упрощения работы с данными сформированы гидрологические и гидрохимические базы данных:

- «Гидрохимические показатели р. Белая и ее притоков»;
- «Основные характеристики поймы р. Белая и ее основных притоков».

2.2 Методы исследования водосборного бассейна р.Уфы

В качестве методов анализа использовались:

Методы определения расходов воды в водотоках, недостаточно обеспеченных гидрологическими данными, в частности:

- геостатистический метод определения расходов воды в реках на основе цифровой модели рельефа (метод корреляции карт);
- метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока;

Фрактальный анализ гидрографической сети водосборного бассейна в пяти масштабах (на примере р. Уфы);

2.2.1 Геостатистический метод определения расходов воды в реках на основе цифровой модели рельефа (метод корреляции карт)

В настоящей работе в качестве способа прогнозирования расходов в створах с ограниченной гидрологической изученностью предложен геостатистический метод корреляции карт.

Метод корреляции карт, впервые описанный S. A. Archfield и R. M. Vogel в 2010 [29], представляющий собой комбинацию методов пространственной интерполяции и физико-географического подобия, в котором опорные посты

выбираются по принципу наибольшей корреляции с территориями, неохваченными измерениями. Новизна метода заключается в том, что он позволяет выделить территории с подобными стокоформирующими условиями на основе корреляционных зависимостей и подобрать для водотоков, протекающих по водосборам с недостаточной гидрологической изученностью, створ-аналог по принципу наибольшей корреляции гидрографов.

Метод корреляции карт имеет ряд ограничений и допущений, представленных в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Перечень допущений и ограничений метода корреляции карт [29, 161]

Допущения	Ограничения
1. Колебания гидрографа неизмеренного водосбора происходит синхронно с опорным постом	1. Нулевые значения стока
2. Основное отличие между двумя водосборами заключается в площади их водосборов	2. Низкая плотность сети постов наблюдения
3. Можно определить корреляцию между ежедневными расходами измеренного створа и створом, находящимся в любой точке исследуемого водосбора.	3. Пропуски в данных о ежедневных расходах.
4. Область исследования однородна и не ограничивается регионами или другими гидрологическими границами	
5. Надежность метода обеспечивается при ограниченном количестве створов	
6. Продолжительность совместных наблюдений на исследуемых створах должна быть в течение достаточно длительного периода, для обеспечения достоверных значений корреляции	
7. Значения корреляций изотропны в исследуемой области.	

Метод корреляции карт был применен для моделирования расходов малоизученных водосборов в США (Archfield and Vogel 2010) [29], Норвегии (Zegelew and Alfredsen, 2014) [162], Франции (Droque and Plasse, 2014) [163], и Турции (Kayra Ergen, Elcin Kentel, 2016) [161].

Основные этапы метода корреляции карт представлены в виде схемы на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Этапы метода корреляции карт представлены в виде схемы на рисунке

Методы расширения и дополнения гидрологических данных, которые также используют корреляцию между значениями речного стока для идентификации эталонного поста, широко использовались в течение более трех десятилетий, поэтому, можно обоснованно предположить, что этот метод будет применяться для исследования и в других регионах.

2.2.1.1 Подготовка ежедневных данных о расходах воды в исследуемых створах. Анализ данных

Реализация метода начиналась с анализа входных данных: определялась исследуемая территория, наличие и взаимное расположение гидрологических створов на данной территории, оценка продолжительности совместных наблюдений всех створов, относящихся к исследуемой территории, оценка полноты информации о ежедневных расходах (наличие/отсутствие периодов с нулевым расходом, пропущенных данных), определение случайных и систематических погрешностей исходных данных гидрометеорологических наблюдений.

На следующем этапе определялись корреляции между рядами ежедневных значений расходов воды в исследуемых створах. При моделировании расходов высокие значения корреляций гидрографов - эта мера идентичности стокоформирующих физических и климатических характеристик исследуемых водосборов. Согласно методике предполагалось, что пики половодья и периоды межени на территориях с недостаточной гидрологической изученностью наступают в тот же день, что и в опорном створе (т.е. створ относительно которого определяется коэффициент корреляции). Если временные ряды ежедневных расходов воды двух водосборов характеризуются высокими значениями корреляций, то все высокие, средние и низкие периоды водности будут проходить в один и тот же день, в каждом пункте, независимо от величины речного стока. Выбор створа-аналога с высокими показателями коэффициентов корреляции освобождает от детального анализа процессов

формирования стока. Фактически, величина коэффициента корреляция является метрикой по которой отбираются створы - аналоги [161].

В настоящем исследовании рассчитывался коэффициент линейной корреляция r (корреляция Пирсона), показывающая линейную зависимость между 2 рядами данных (формула 2.1)

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2] \cdot [n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}; \quad (2.1)$$

где x_i - значения, принимаемые переменной X;

y_i - значения, принимаемые переменной Y;

$\bar{x}$ - средняя по X;

$\bar{y}$ - средняя по Y;

n – количество объектов в выборке.

2.2.1.2 Выбор метода интерполяции и функции для моделирования поверхности

Повышение достоверности гидрологических величин, полученных на основе метода корреляции карт, достигается путем выбора подходящего метода интерполяции, который зависит от природы изучаемой переменной и связанной с ней пространственной структурой. Различные методы интерполяции имеют свои преимущества и недостатки [36]:

- до десяти точек на исследуемой территории достаточно только для определения общего тренда данных. В этом случае, как и с большими выборками данных, лучшую интерполяцию данных производят кригинг и метод радиальных базисных функций. Линейная интерполяция не эффективна;

- для интерполяции малых выборок (меньше 250 наблюдений) хорошие результаты достигаются применением кригинга и метода радиальных базисных функций;

- с рядами данных среднего и большого размера (более 250 точек исходных данных) хорошее представление данных дает триангуляция с линейной интерполяцией, подходит кригинг и радиальная базисная функция;
- кригинг — один из наиболее универсальных методов. Он применим для интерполяции рядов данных почти любого типа. С большинством наборов данных весьма эффективен кригинг с линейной структурной функцией. Кригинг может экстраполировать значения вне диапазона данных [164].

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (2.2)$$

$Z(S_i)$ - измеряемое значение в местоположении i ;

λ_i - неизвестный вес для измеряемого значения в местоположении i ;

S_0 - местоположение прогноза;

n - количество измеряемых значений.

- метод обратных расстояний имеет тенденцию создавать вокруг точек данных концентрические контуры, так называемые мишени. Метод не экстраполирует значения вне диапазона данных;
- радиальная базисная функция наравне с кригингом переменяется часто, так как производит лучшие полные интерпретации из большинства наборов данных.
- триангуляция Делоне. Когда обрабатываются даже небольшие наборы данных, метод вырабатывает удовлетворительные треугольные плоскости между точками данных. Метод не экстраполирует значения вне диапазона данных.

Поскольку для построения карт интерполяции для водосборного бассейна р. Уфа использовалась выборка данных, полученных на 25 гидрологических постах, для интерполяции выбран ординарный кригинг.

На следующем этапе выполнялась перекрестная проверка (кросс – валидация) т.е. «насколько хорошо» модель интерполирует неизвестные значения. Для всех точек в ходе выполнения перекрестной проверки

выполнялась следующая операция: точки последовательно исключались из выборки, далее вычислялись значения в этой точке с использованием оставшихся данных, а затем измеренное и вычисленное значение сравнивались. По суммарной статистике перекрестной проверки определялось, подходит ли модель для составления карты.

Цель перекрестной проверки – помощь в принятии обоснованного решения о том, какая из моделей наиболее точно интерполирует значения. Для модели, которая точно интерполирует значения, средняя ошибка должна быть близка к 0, среднеквадратичная ошибка и среднее из стандартных ошибок интерполяции должно иметь наименьшее из возможных значений, а среднеквадратичная нормированная ошибка должна быть близка к 1.

Средняя ошибка – усредненная разность между измерением и проинтерполированным значением.

$$\text{Средняя ошибка} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))}{n} \quad (2.3)$$

где $\hat{Z}(s_i)$ – проинтерполированное значение;

$Z(s_i)$ – измеренное или рассчитанное значение в точке наблюдения;

Среднеквадратичная ошибка указывает насколько близко модель прогнозирует замеренные значения. Чем меньше эта ошибка, тем ближе модель к реальным значениям.

$$\text{Среднеквадратическая ошибка} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))^2}{n}} \quad (2.4)$$

Средняя стандартная ошибка – среднее значение стандартных ошибок интерполяции.

$$\text{Средняя стандартная ошибка} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma(s_i)}{n}} \quad (2.5)$$

где, $\sigma(s_i)$ – стандартная ошибка интерполяции для точки s_i .

Средняя нормированная ошибка – среднее значение нормированной ошибки. Это значение должно быть близко к 0.

$$\text{Средняя нормированная ошибка} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))}{\sigma(s_i)}}{n} \quad (2.6)$$

Среднеквадратичная нормированная ошибка – стремится к единице в случае, если стандартные ошибки интерполяции допустимы. Если среднеквадратичная нормированная ошибка больше единицы, значит, в проинтерполированных значениях недооценена вариабельность. Если среднеквадратичная нормированная ошибка меньше единицы, значит, в проинтерполированных значениях вариабельность переоценена.

$$\text{Среднеквадратичная нормированная ошибка} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\hat{Z}(s_i) - Z(s_i)}{\sigma(s_i)} \right]^2}{n}} \quad (2.7)$$

Стандартные ошибки количественно характеризуют неопределенность интерполяции для каждой точки построенной поверхности. В 95 % случаев, истинное значение поверхности будет равно проинтерполированному значению ± 2 двукратная стандартная ошибка интерполяции, если данные подчиняются закону нормального распределения. На поверхности стандартной ошибки интерполяции точки, расположенные ближе к точкам выборки, как правило, имеют более низкую ошибку [164].

При интерполяции возможно моделирование поверхностей интерполяции с использованием двух функций вариограмма или ковариации.

Вариограмма - это функция, которая связывает дисперсию (или различие) опорных точек и расстояние, на которое они отстоят друг от друга. Ее графическое представление используется для получения картины пространственной корреляции опорных точек и их соседей, позволяет изучить пространственную автокорреляцию между опорными точками.

Пространственная автокорреляция опирается на предположение, что объекты, которые расположены ближе всего друг к другу, в наибольшей степени похожи, чем удаленные друг от друга на некоторое расстояние. Вариограмма и ковариация измеряют степень статистической корреляции как функцию расстояния.

Процесс моделирования вариограмм и функций ковариации подбирает кривую вариограммы или ковариации к эмпирическим данным. Целью является достижение наилучшего соответствия, а также применение в модели знаний о явлении. Затем модель будет использоваться при интерполяции.

При настройке модели необходимо исследовать направленную автокорреляцию в данных. Важными характеристиками модели являются Диапазон (Range), Порог (Sill) и Самородок (Nugget). Если в данных имеются погрешности измерений, используйте модель погрешности измерений.

Вариограмма определяется как:

$$\gamma(s_i, s_j) = \frac{1}{2} \text{var} (Z(s_i) - Z(s_j)) \quad (2.8)$$

где var является дисперсией.

Если два местоположения, s_i и s_j , близки друг к другу в единицах измерения расстояния $d(s_i, s_j)$, можно ожидать, что они похожи, так что разность их значений, $Z(s_i) - Z(s_j)$, будет мала. По мере дальнейшего удаления i и s_j друг от друга они становятся менее похожи, поэтому разность их значений, $Z(s_i) - Z(s_j)$, станет больше. Это можно видеть на следующем рисунке, на котором показано, из чего состоит типичная вариограмма (рисунок 2.5).

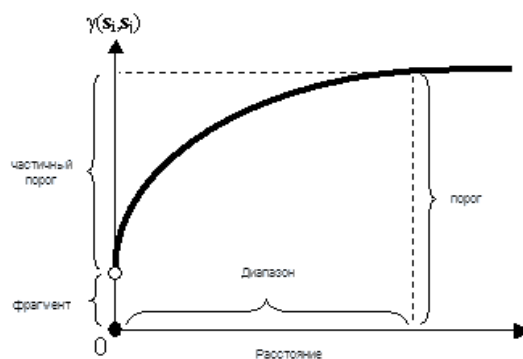


Рисунок 2.5 - Вариограмма

Функция ковариации определяется как:

$$C(s_i, s_j) = \text{cov}(Z(s_i), Z(s_j)) \quad (2.9)$$

где cov является ковариацией.

Ковариация является масштабируемой версией корреляции. Если два местоположения, s_i и s_j , близки друг к другу, можно ожидать, что они похожи, и их ковариация (корреляция) будет большой. По мере дальнейшего удаления s_i и s_j друг от друга они становятся менее похожи, и их ковариация стремится к нулю. Это можно видеть на следующем рисунке, на котором показана типичная функция ковариации (рисунок 2.6).

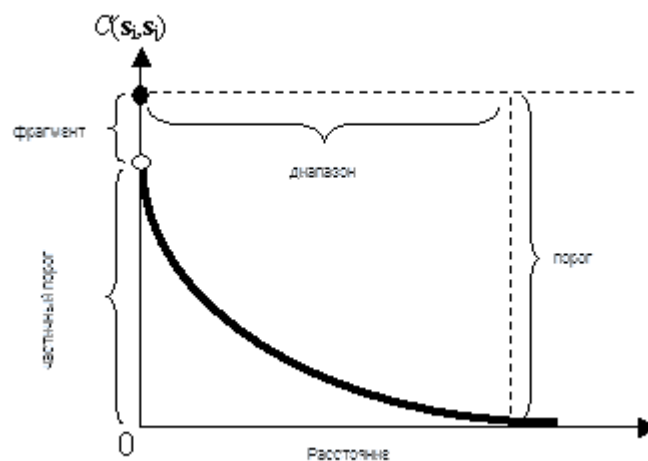


Рисунок 2.6 - Функция ковариации

Функция ковариации уменьшается с расстоянием, поэтому ее можно рассматривать как функцию сходства. Между вариограммой и функцией ковариации имеется связь (2.10) [164].

$$\gamma(s_i, s_j) = \text{sill} - C(s_i, s_j) \quad (2.10)$$

В целях минимизации погрешности интерполяции для исследуемых 25 постов, расположенных на территории водосбора р. Уфа, проводилась кросс-

валидация при моделировании поверхности с помощью вариограммы и ковариации. Данные о средних ошибках приведены в таблицах Приложения А. Согласно результатам, представленным в таблице Приложения А, вариант распределения точек сферической вариограммой показал большую достоверность.

2.2.1.3 Методика геомоделирования расходов воды в реках методом корреляции карт

После определения наиболее подходящей функции интерполяции производился расчет значений коэффициентов корреляций между временными рядами ежедневных расходов воды в створах на исследуемой территории (неповторяющиеся пары створов) за многолетний период.

Далее, следуя методике, каждый из 25 исследуемых створов поочередно принимался за опорный, относительно которого и определялись коэффициенты корреляции, а известные значения корреляций по очереди принималась за «неизученные» и удалялись из выборки, чтобы исключить влияния «неизмеренного» створа на выбор створа –аналога.

Для получения «смоделированных» коэффициентов корреляции гидрографов рек (r_{mod}) для 25 створов построено 600 карт интерполированных поверхностей. Общее количество построенных карт рассчитывалось по формуле 2.11.

$$N = n^2 - n \quad (2.11)$$

где n – общее количество створов на исследуемой территории. Построенные карты позволяют выделить зоны гидрологической однородности, демонстрируют пространственное распределение корреляции между данным гидрологических створов и любой заданной точкой исследуемой области.

По достраиваемой модели интерполяционного покрытия определялись значения r_{mod} специально пропущенного значения. В целом процедура

напоминала процесс кросс-валидации, с удалением 1 значения из выборки и последующим его восстановлением.

На следующем этапе к каждому опорному створу выбирался створ аналог по наибольшему значению коэффициента «смоделированной» корреляции. Среднегодовое значение стока в створе «не охваченном наблюдениями» рассчитывалось по методу соотношения площадей (формула 2.12) [165].

Наиболее простой и хорошо изученный метод для оценки временных рядов ежедневных расходов на неизученных территориях с помощью эталонного поста, где ежедневный расход за заданный день t вычисляется по соотношению

$$Q_1 = \frac{A_1}{A_2} \cdot Q_2 \quad (2.12)$$

где Q_1 - расход (среднегодовой / в заданный период времени t) для створа, который необходимо найти;

Q_2 - известный расход (среднегодовой / в заданный период времени t) для справочного створа, обладающего наибольшей корреляцией с исследуемым Q_1 ;

A_1 и A_2 - площади водосборов неизвестного и справочного створа соответственно.

Уравнение 2.12 подразумевает, что речной сток с удельной площади водосбора и не охваченного наблюдениями эталонного водосбора равны для любого заданного времени t .

В этом методе, время определяемого потока на неизмеренной территории полностью зависит от опорного поста. Этот метод измерения предполагает, что высокие, низкие и средние диапазоны расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью происходят в тот же день, что и в опорном poste. Данный способ предполагает, что изменение расходов рек в створах неохваченных наблюдениями происходит симбатно с эталонными. Если временные ряды речного стока двух водосборов характеризуются высоким коэффициентом корреляции, то все высокие, средние и низкие периоды

водности будут проходить в один и тот же день, в каждом пункте, не зависимо от величины речного стока [166].

В качестве критерия для оценки соответствия фактических и смоделированных гидрографов использовались:

- относительная погрешность измерения, %;
- критерий Нэша - Сатклиффа (NSE) рассчитанный по формуле 2.13 [167].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_1^n (Q_{\text{рассч}} - Q_{\text{набл}})^2}{\sum_1^n (Q_{\text{набл}} - \overline{Q_{\text{набл}}})^2} \quad (2.13)$$

где: где $Q_{\text{рассч}}$ и $Q_{\text{набл}}$ – расчетное и наблюдаемое (измеряемое) значения соответственно;

$\overline{Q_{\text{набл}}}$ – среднее наблюдаемое (измеряемое) значение.

NSE используется Всемирной метеорологической организацией для сравнительного анализа моделей, характеризует различие между значениями измеренного и рассчитанного рядов по отношению к изменчивости наблюдаемого ряда [168]. Считается, что при $NSE > 0,5$ модель хорошо воспроизводит динамику моделируемой величины, при $NSE = 1$ модельный расчет признается полностью адекватным. При $NSE < 0$ модель признается несостоятельной. В отличие от относительной погрешности критерий рассчитывается на основе всего временного ряда, а не среднемноголетнего значения.

2.2.2 Метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока

Альтернативным методом определения расходов воды в створах, не охваченных гидрологическими измерениями является прогнозирование с помощью построения карты модуля стока методом интерполяции крикниг.

Модуль стока M – количество воды, стекающей с единицы площади водосбора в единицу времени, определялся по формуле 2.14:

$$M = (Q \cdot 10^3) / F \quad (2.14)$$

где F — площадь водосбора, км²,

10^3 – переводной коэффициент из метров кубических в литры [169].

Построение карты модуля стока включало в себя несколько этапов:

1) Определение границ водосборов происходило по данным ЦМР с использованием стандартных функций геоинформационного пакета Arcgis

2) Определение центров тяжести полигонов водосборов. Поскольку алгоритм кригинга может обрабатывать только точечные данные, то для каждого из 25 водосборов, относящихся к водосборной территории р. Уфа определялись центры тяжести полигонов водосборных бассейнов с помощью инструмента «Объект в точку»;

3) Присвоение центру водосбора значения модуля стока. Каждому центру водосборного полигона присваивалось значение модуля стока, вычисленное по данным среднегодовых расходов воды в реке и фактической площади водосбора;

4) Выбор максимально достоверной модели интерполяции. Протестировав несколько моделей интерполяций установлено, что ошибки интерполяции минимальны при использовании модели ковариации.

5) Построение поверхности модуля стока. После построения поверхности модуля стока она сохраняется в растровом формате, таким образом каждая ячейка раstra хранит информацию о модуле стока, т.е. сколько воды стекает именно с поверхности этой ячейки.

Для того, чтобы разделить полученную гидрографическую сеть на отдельные участки по границам водосборов, использована цифровая модель рельефа (ЦМР) построенная на основе данных SRTM - радарная интерферометрическая съемка поверхности земного шара осуществленная в

феврале 2000 г. с борта космического корабля "Шаттл"[170].

Точность матрицы SRTM исследовалась учеными разных стран. Karwel A. K. и Ewiak I [171] оценили ошибку матрицы SRTM следующими величинами: для равнинной местности - 2,9 м, холмистой – 5,4 м. По их мнению, матрица SRTM подходит для создания горизонталей на картах масштаба 1:50 000. Ю. И. Карионов [172] показал соответствие точности матрицы SRTM и матрицы карты масштаба 1:100 000. По мнению автора, матрица SRTM может быть использована при создании ортофотопланов в масштабе 1:25 000 и мельче на районы с равнинным и всхолмленным рельефом [172, 173].

Кроме SRTM, в свободном доступе находятся глобальная цифровая модель рельефа ASTER GDEM. ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) - усовершенствованный спутниковый радиометр теплового излучения и отражения, разрешение которой составляет 1 угловая секунда (30 м). Существенным недостатком ASTER GDEM является отсутствие возможности идентифицировать водный объект [174, 175].

Помимо этого, существуют цифровые модели рельефа, которые распространяются на коммерческой основе, такие как: WorldDEM, NextMap World 10 и NextMap World 30, ALOS AW3D [174].

В настоящем исследовании для построения ЦМР водосборного бассейна р. Уфа использовано 4 фрагмента SRTM с размером ячейки 3 угловые минуты, которые загружались в программу ArcGIS и объединялись в 1 растр. Границы водосборов построены с помощью стандартных функций геоинформационных систем в программном пакете ArcGIS при помощи модуля «Spatial Analyst» и группы инструментов Гидрология (Hidrology), которые используются для моделирования течения потока воды по поверхности, определение границ водосборных бассейнов, порядков рек и др. Порядок определения границ водосборных бассейнов рек представлен в виде схемы на рисунке 2.7 [176-178].

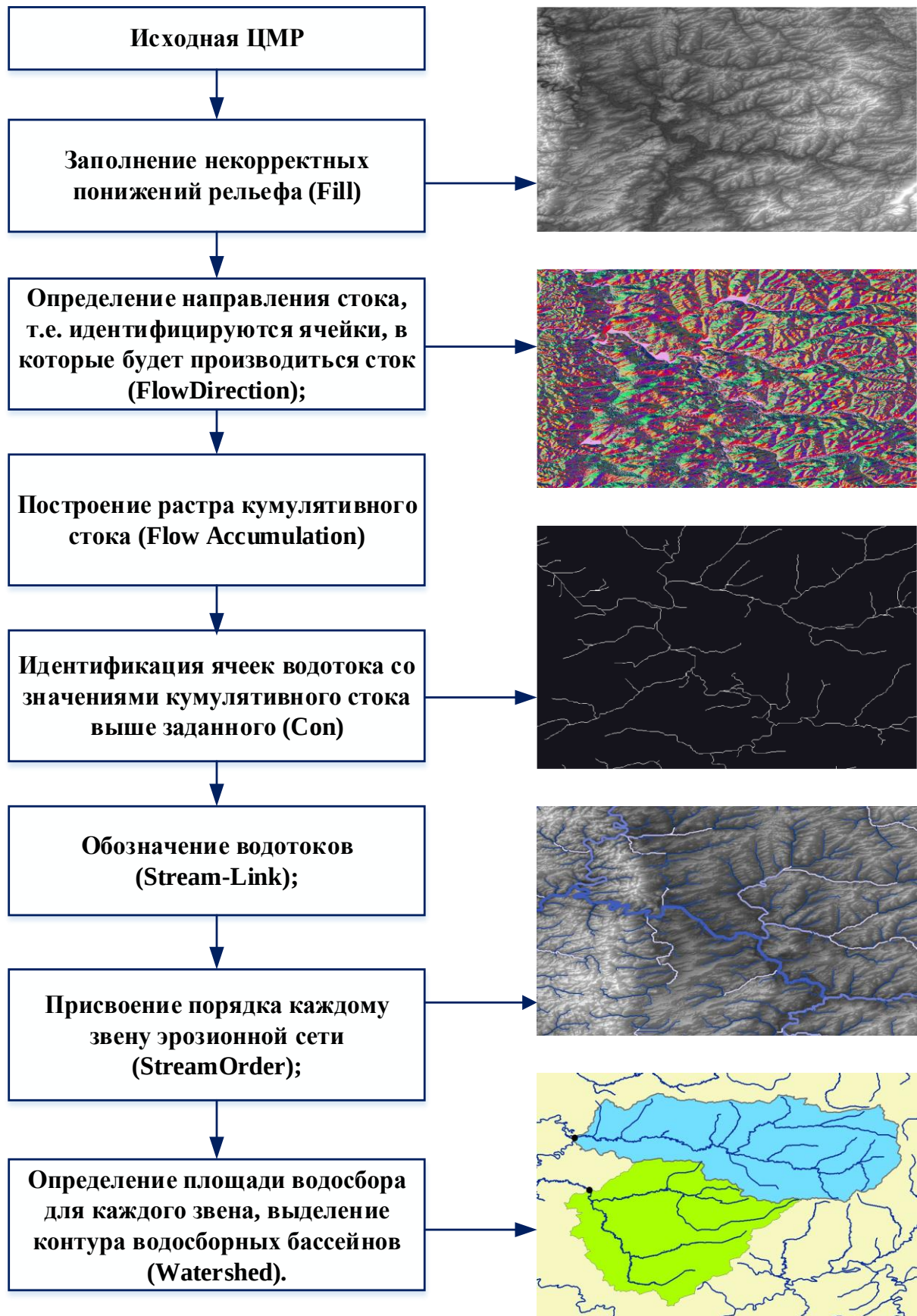


Рисунок 2.7 – Порядок определения площади водосборного бассейна реки

На начальном этапе моделирования речной системы использовался инструмент «Fill» для заполнения локальных понижений в растре поверхности для удаления ошибок и неточностей, присущих данным ЦМР [179].

Затем по скорректированной цифровой модели рельефа определялись направления стока с помощью инструмента «Flow Direction». Каждая ячейка растра содержит информацию о направлении движения потока. На ее основе формировались линии водотоков. Ячейки растра принимают одно из девяти возможных значения (рисунок 2.8).

32	64	128
16		1
8	4	2

Рисунок 2.8 - Схема присвоения ячейкам значения направления стока

Далее для каждой элементарной ячейки цифровой модели рельефа производился расчет кумулятивных значений стока. Эти значения представляют собой число ячеек, вносящих свой сток в оцениваемую ячейку под действием сил гравитации, то есть фактически характеризуют площадь водосбора. Данная операция реализована инструментом «Flow Accumulation» [180].

Максимальные значения суммарного стока имеют ячейки, соответствующие руслам крупных рек. Для того чтобы выделить не только крупные, но и малые реки, а в последующем выделить границы водосборов, необходимо установить минимальное пороговое значение суммарного стока, соответствующее водотокам. Пороговое значение выбиралось исходя из представлений о том, при какой минимальной площади водосбора образуются поверхностные водотоки с устойчивым стоком в течение всего года [180]. С помощью инструмента «Raster Calculator» было задано пороговое значение для идентификации водотоков, которое составило 1000. На выходе получился бинарный растр, в котором ячейки со значением «1» удовлетворяют условию > 1000 , а со значением «0» –

нет < 1000. В результате умножения этого раstra на растр суммарного стока остались только ячейки с со значением больше 1000, сформировалась гидрографическая сеть синтетических рек [174]. На завершающем этапе с помощью инструмента «Watershed» определялись границы водосборных бассейнов и сохранялись в виде векторного слоя.

При сравнении слоев гидрографии реальных и синтетических рек наибольшее совпадение слоя синтетических рек зафиксировано со слоем гидрографии в масштабе 1:200 000. Далее слой синтетических рек сопоставлялся со слоями гидрографии реальных рек. В итоге получен перечень из 101 малой реки с площадями водосборов от 68 до 1915 км² (Приложение Б).

2.2.3 Фрактальный анализ

Методология определения фрактальной размерности характеристик речной сети опирается, прежде всего, на современные методы фрактального анализа, применяемые для исследования сложных естественных структур: метод Ричардсона [181]; метод расчета фрактальной размерности речной сети с использованием теории порядка рек; метод, основанный на зависимости между длиной русла реки и площади водосборного бассейна; метод квадратов (box-counting) [134] (формула 2.15).

$$D = \lim_{\chi \rightarrow 0} \frac{\ln N(\chi)}{\ln 1/\chi} \quad (2.15)$$

где χ - масштаб измерения;

$N(\chi)$ - число шагов.

В Главе 1 описаны несколько способов определения фрактальной размерности, применение которых обуславливается спецификой поставленной задачи [182]. На сегодняшний день разработано несколько программных продуктов, предназначенных для расчета фрактальной размерности, а также специальных модулей и плагинов для уже существующих программ (например,

геоинформационного пакета QGIS [183]). Для отработки методики определения фрактальной размерности речных сетей в настоящей работе выбрано 6 программ, находящихся в открытом доступе (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Программные продукты для определения фрактальной размерности

	Название	Авторы	Тип	Инструменты	Тип используемого изображения
1	FrakOut!	Google, GNU GPL v3, 2001[184]	Фрактальный анализ	Box counting	Растровое
2	HarFA	Martin Nezhadal, Brno University - 1-Oct-2011 [185]	Фрактальный и Фурье анализ	Box count, Фурье анализ	Растровое
3	Frac	Hiroyuki Sasaki, 1998-2002 [186]	Фрактальная размерность	Box counting	Растровое
4	ImageJ	National Institutes of Health 1997 [187]	Фрактальная размерность	Box counting,	Растровое
5	FracLac	Audrey Karpieren, 2003 [187]	Фрактальный анализ	Box counting, лакунарность	Растровое
6	QGIS (Minkowski dimension calculator)	Eduard Kazakov, 2015 [188]	Фрактальная размерность Минковского	Box counting,	Векторное

Далее приведено описание каждой программы и особенности реализации алгоритма.

- **FrakOut!** - приложение Google для расчета фрактальной размерности сложных форм, например, побережья страны [184]. FrakOut! реализует метод box- counting (рисунок 2.9). Данная методика заключается в наложении на изображение реки сетки с квадратными ячейками n различных по размерам начиная с крупных и заканчивая мелкими и подсчитывается количество ячеек N , содержащих линии речной сети (рисунок 2.10).

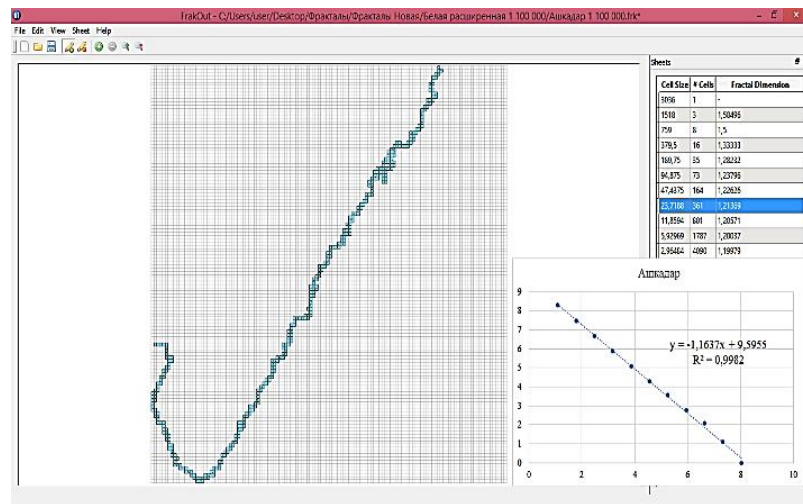


Рисунок 2.9 –Диалоговое окно программы FrakOut! при расчете фрактальной размерности

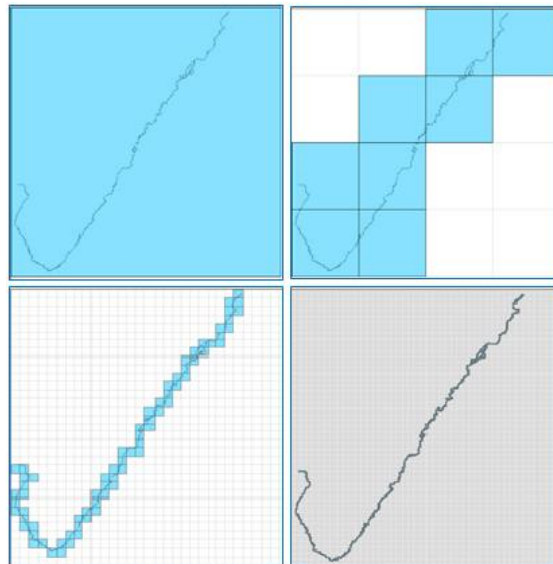


Рисунок 2.10 - Пример расчета фрактальной размерности реки

Фрактальная размерность определялась посредством построения графика в двойном логарифмическом масштабе зависимости $N(n)$, где n - размер ячеек, N - количество ячеек. Тангенс угла наклона данной прямой, взятый с обратным знаком, соответствует значению фрактальной размерности исследуемого объекта [52, 134].

В качестве самой крупной ячейки задается квадрат со стороной равной большей из сторон анализируемого изображения (если размер изображения 683×480 пикселей, то самой размер самой крупной ячейки составлял - 683×683).

На каждом последующем уровне происходило уменьшение размера ячейки в 4 раза по отношению к предыдущему. Деление на уровни останавливалось при достижении минимальной ячейкой размера 2×2 или 3×3 .

Программа FrakOut! не исключает субъективный фактор при подсчете ячеек заполненных изображением.

Таким образом, определение фрактальной размерности данным способом зависело от начального размера изображения и положения сетки.

Расчет вручную сильно замедлял процесс получения результата, однако сделал его наглядным, что помогает сформировать представления о фрактальном анализе.

HarFA (Harmonic и Fractal) представляет собой программу, написанную на Borland Pascal в Институте физической и прикладной химии, Технологический университет г. Брно, Чехия [185]. В настоящей работе использована демо-версия HarFa 5.0. Harfa многофункциональная программа, позволяющая производить гармонический анализ, фрактальный анализ и фильтрацию цифровых изображений. Фрактальная размерность получалась с помощью вариации (разновидности) метода box - counting. Эта программа позволяет разграничить белые и черные области изображения и отдельно определить их фрактальную размерность. Например, можно задавать минимальное пороговое значение или диапазон оттенков, которые будут распознаваться как черное, а все остальные пиксели становятся белыми.

Таким образом, возможно получить различные фрактальные размерности для одного изображения. В частности, получить 3 значения (рисунок 2.11):

- bw - black and white – фрактальная размерность границ контура черного и белого,
- b+bw – фрактальная размерность черного изображения + границ контура черного и белого,
- w+bw – фрактальная размерность белого изображения + границ черного и белого.

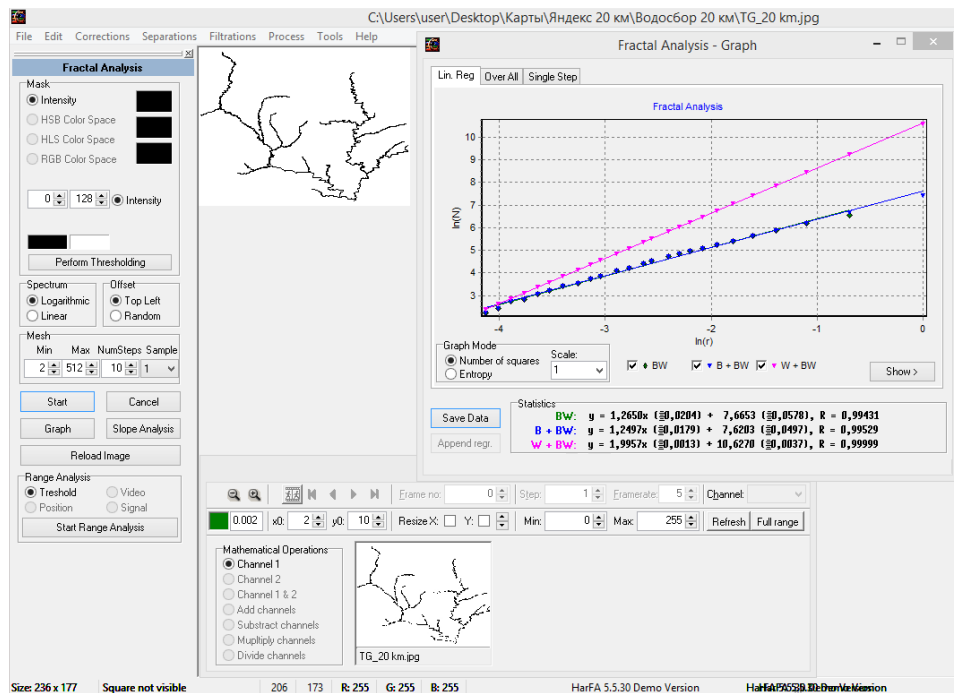


Рисунок 2.11 - Диалоговое окно программы HarFA

Каждое анализируемое изображение должно быть квадратной формы длиной от 2 до 2048 пикселей (выбирается в пределах ряда геометрической прогрессии с знаменателем 2) [185].

Программа HarFa примечательна возможностью построения сразу нескольких графиков при анализе черно-белого изображения (b+w) и границ черного и белого, и черного изображения (b + bw).

Frac (Fractal analysis system for Windows), программа разработана Hiroyuki Sasaki в Национальной организации сельского хозяйства и исследования пищевых продуктов (NARO), Япония. Написана на Object Pascal [186]. Программа получена по личному разрешению автора и позволяла вычислить фрактальную размерность цветного, серого, двоичного (черный и белый) изображений, а также слоев 3D изображений в формате (BMP). Фрактальная размерность рассчитывалась методом box-counting после предварительной обработки. Изолированные черные точки могут быть удалены, и медианный фильтр может быть применен в случае бинарного изображения с высоким уровнем шума. Отношения между размером ячейки и их количеством отображаются с помощью участка графика (рисунок 2.12).

Отношения между размером ячейки и их количеством отображались в виде графика. В процессе анализа любые данные могут быть удалены или отредактированы, а значения фрактальной размерности - пересчитаны.

После вычисления фрактальной размерности удалялись выпадающие точки, для того, чтобы график стал линейным. Для определения фрактальной размерности выбиралось изображение с шириной и высотой из ряда геометрической прогрессии со знаменателем 2 (например, 512 шириной и 256 высотой).

Минимальный размер ячейки при анализе 2×2 , на каждом уровне размер ячейки увеличивается как 2^n . Таким образом, рассматриваемая программа напрямую зависела от выбора оператора. И фрактальная размерность для одного и того же изображения могла варьироваться в широком диапазоне.

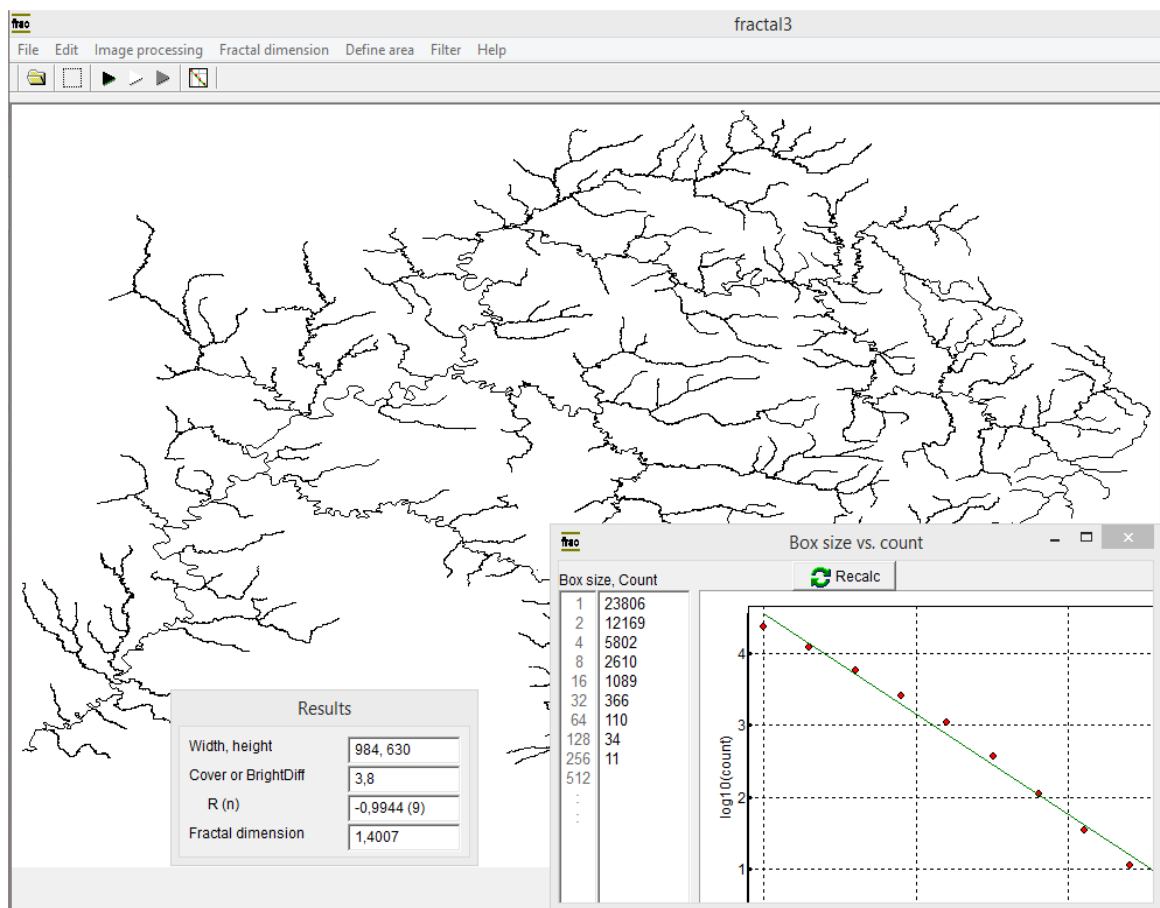


Рисунок 2.12 – Диалоговое окно программы Frac

ImageJ представляет собой программу для обработки и анализа изображений, ImageJ – свободно распространяемое кроссплатформенное ПО [187]. ImageJ создан с открытой архитектурой, которая обеспечивает расширяемость при помощи плагинов Java, а также записываемых макросов. ImageJ реализован на языке Java, отличается высокой производительностью, позволяет отображать, редактировать, анализировать, обрабатывать 8-битные, 16-битные и 32-битные изображения. Программа работает со многими изображениями в форматах: TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS, а также raw формате [189].

Одна из функций ImageJ позволила произвести расчет фрактальной размерности по алгоритму box-counting следующим образом. В программу загружалось изображение, затем оно конвертировалось в бинарный вид. Для минимизации погрешности между программами размер ячеек задавался рядом геометрической прогрессии 2^n , пример диалогового окна представлен на рисунке 2.13.

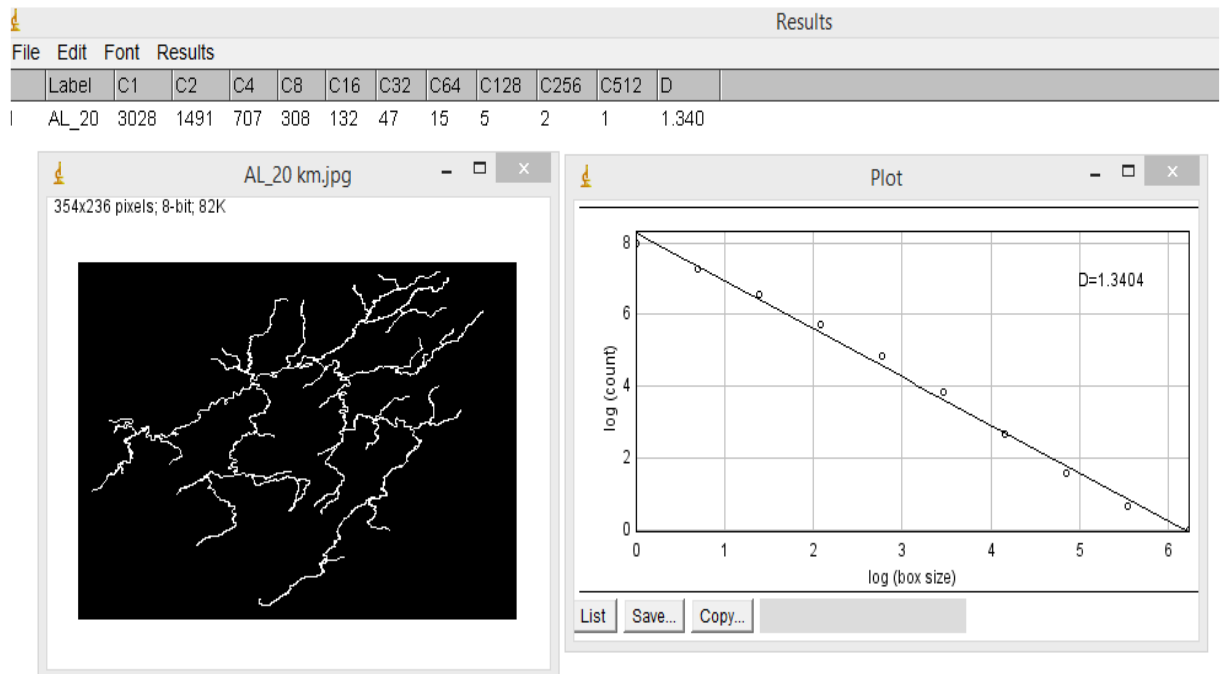
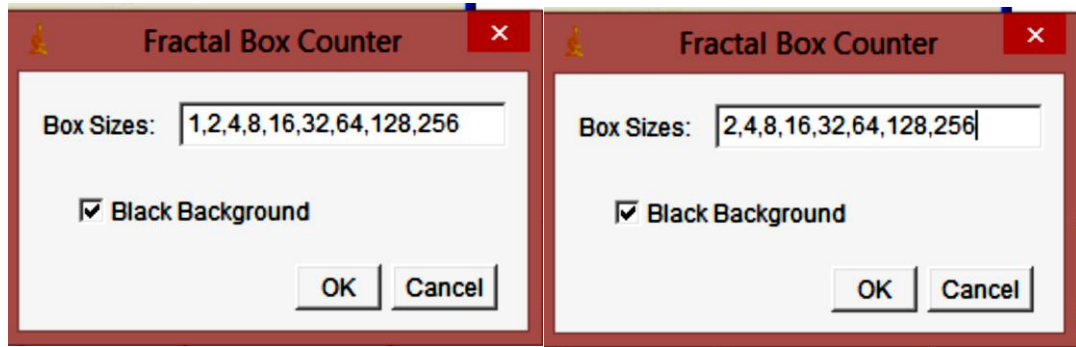


Рисунок 2.13 – Диалоговое окно программы ImageJ



а

б

Рисунок 2.14- Диалоговое окно Fractal Box Count в ImageJ для задавания размеров и количества расчётных ячеек

В данной программе размер и количество ячеек задавались оператором (рисунок 2.14).

FracLac - это программное обеспечение для анализа изображений разработанное как плагин для ImageJ в лаборатории в Университета Чарльза Стерта, Австралия (рисунок 2.15). Автором программного обеспечения является А. Karperien. Базовый алгоритм box- counting используемый ImageJ преобразован на основе обширных исследований и разработок. FracLac представляет собой набор фрактальных функций анализа и морфологии, с широким функционалом возможностей. Например, во FracLac учитывается зависимость конечного результата от ориентации сетки. Для минимизации погрешности задавалось несколько положений расчетной сетки по отношению к анализируемому изображению и рассчитывалось среднее значение. В настоящем исследовании результаты фрактальной размерности – усредненный результат для 12 положений сетки. Увеличение количества положений сетки способствует более эффективному покрытию изображения, но замедляет расчет.

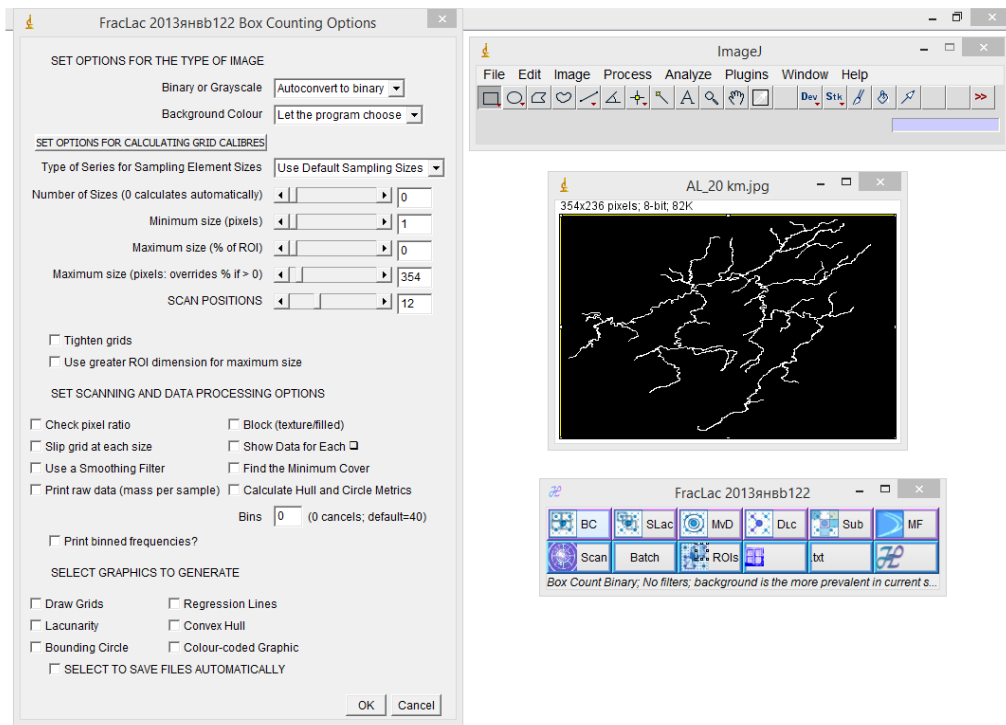


Рисунок 2.15 -Диалоговое окно программы FracLac

Программа позволяет задавать максимальный и минимальный размер ячейки в пикселях и способ увеличения размера ячейки (в исследовании рассматривались):

1. Линейный по умолчанию (Default)

Ряд увеличивался в размерах линейно с фиксированным приращением в диапазоне от минимального до максимального значений ячеек. Т.е. задавался только минимальный и максимальный размер ячейки. В качестве максимального задавалось значение большей стороны.

2. Степенной (Power)

Для формирования ряда устанавливались основание и экспонента, например, для основания = 2 и экспоненты = 2, результат равен $2^2 = 4$, $2^4 = 16$, $2^6 = 64$.

3. Масштабированный (Scaled)

Ряд строился на основе произведения максимальной ячейки и задаваемых числителя и знаменателя (полученное значение округлялось до целого)

например, для максимальной ячейки = 178, числителя 1 и знаменателя 3, ряд задавался как: $178 \times (1/3) = 59,3 = 59$, $59,3 \times (1/3) = 19,8 = 20$ и т.д.

4. Относительный (Relative)

Основой данного ряда являлся максимальный размер ячейки. И вся последовательность – это серия всех возможных множителей на которые раскладывается максимальный размер. В последовательности использовались только целые числа и значения не округлялись, например, для 32, серия 1,2,4,8,16, 32 но для 31 ряд состоял только из 1, и 31.

QGIS для определения фрактальной размерности с помощью свободной кроссплатформенной геоинформационной системы (Quantum GIS) использовался модуль Minkowski dimension calculator для объектов из наборов векторных геоданных с линейным типом геометрии.

Основным результатом работы модуля являлось создание нового (или перезапись существующего) атрибута векторного слоя с записью значений фрактальной размерности для каждого объекта слоя. Для проведения расчета выбирался исследуемый векторный слой, задавалось имя атрибута, в который будет записан результат. Далее, в зависимости от выбранного способа построения сетки, задавались параметры.

Модуль поддерживает два подхода к построению сеток для вычисления фрактальной размерности: Layer Grid и Feature Grid (рисунок 2.16).

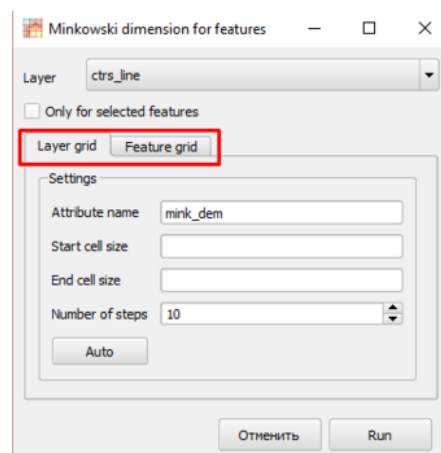


Рисунок 2.16- Диалоговое окно программного модуля Minkowski dimension calculator

Метод Layer Grid подразумевает построение единой сетки на всю исследуемую территорию (фактически, охват сетки совпадет с охватом слоя или выделенных объектов), и одновременный расчет необходимых показателей для всех объектов в области покрытия (рисунок 2.17). При этом параметры сетки (начальный и конечный размер, количество шагов) задаются при расчете один раз. Объекты, анализируемые с помощью одной сетки, должны быть одного масштаба.

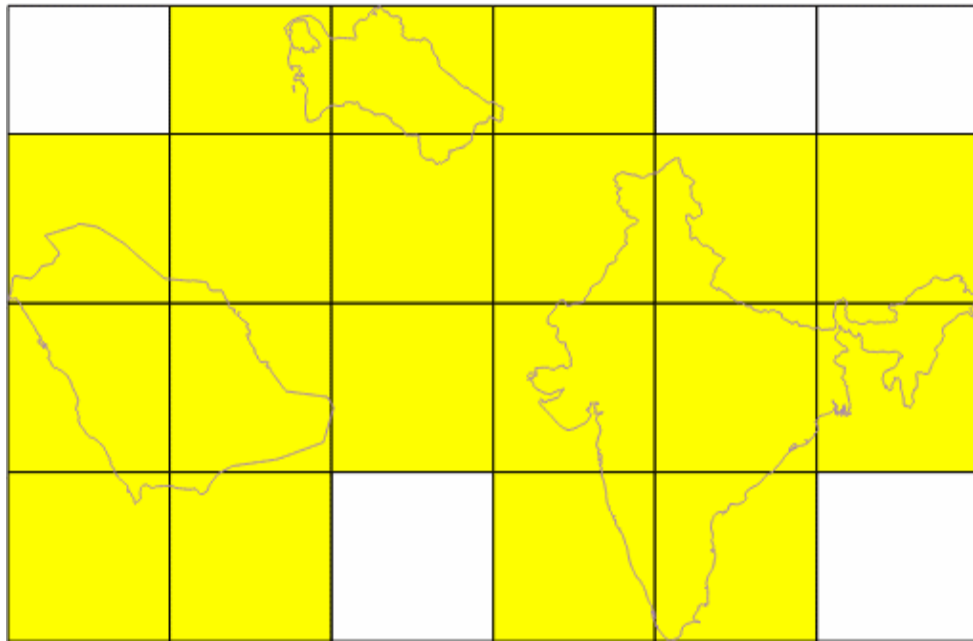


Рисунок 2.17 – Подход Layer Grid пример единой сетки, покрывающей всю территорию исследования [188]

Метод Feature Grid (рисунок 2.18) подразумевает построение отдельных сеток для каждого отдельного объекта, с возможностью задания параметров сетки. В этот режим позволяет задать параметры сеток для каждого отдельного объекта, с учётом сложности и масштаба, и получить результаты фрактальной размерности для каждого из них.

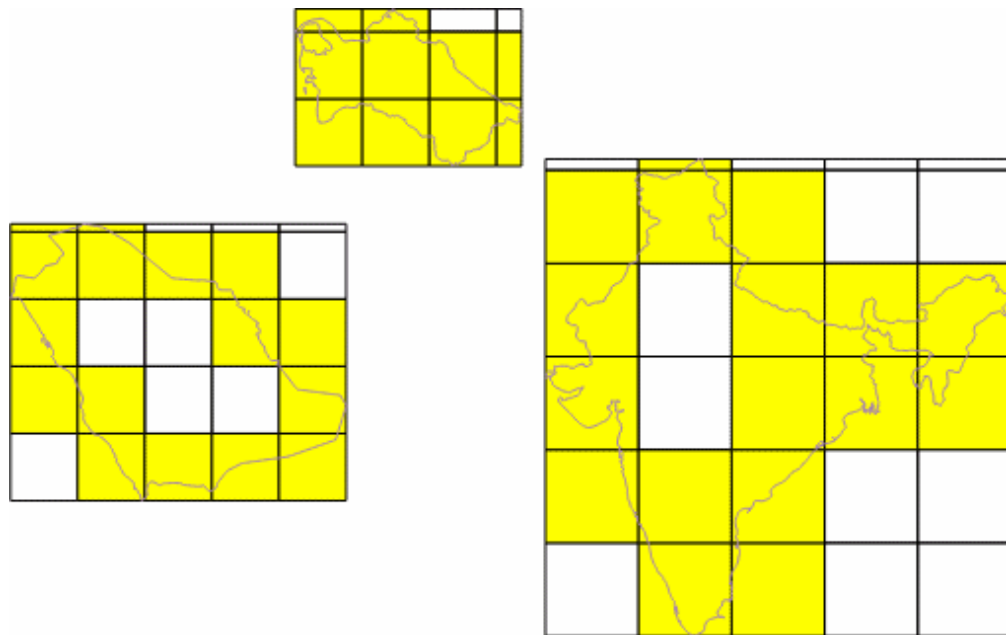


Рисунок 2.18 – Подход Feature Grid сетка, покрывает каждый исследуемый объект [188]

Входными данными для построения сеток являются: размер начальной ячейки (наибольшей), размер конечной ячейки (наименьшей), количество шагов от начального к конечному размерам (рисунок 2.19). Значения задаются на основе величины и масштаба анализируемых объектов.

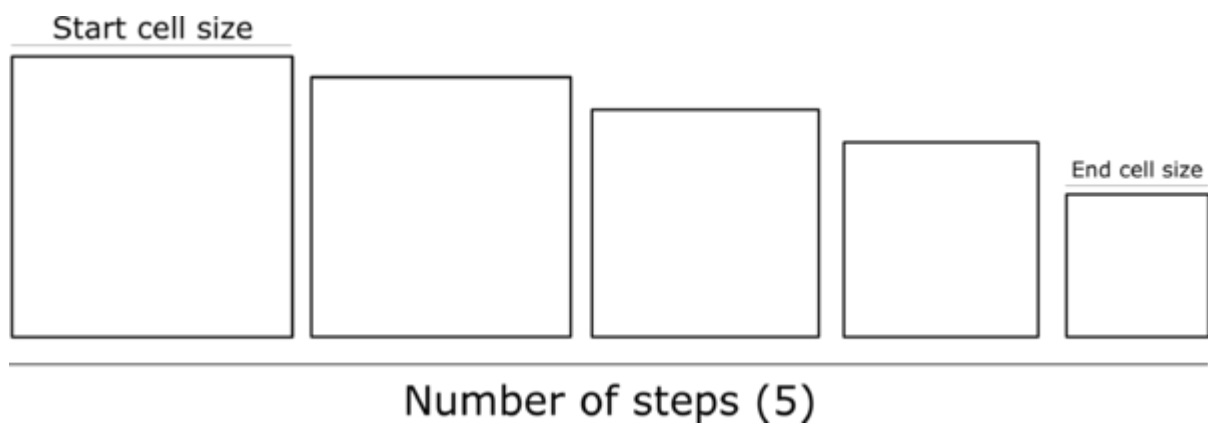


Рисунок 2.19 - Исходные данные для построения сетки [188]

Главное преимущество работы с векторным слоем заключалось в возможности бесконечного приближения изображения без ограничений ячейки в 1 пиксель, но и в этой программе основные параметры: размер максимальной и минимальной ячеек, шаг приращения ячеек – задавался на усмотрение

оператора. Доступен автоматический режим, в котором подбирались минимальная и максимальная ячейка, но число шагов между ними задавалось стандартно равным 30 [188].

В настоящем исследовании фрактальная размерность определялась с использованием подхода Layer Grid, поскольку рассматривались объекты единого масштаба.

Результаты и выводы по главе 2

1. Вторая глава настоящей работы посвящена описанию р. Уфа, ее притоков объекта и методов исследования. Представлен перечень и количество исходных данных, используемых для создания геоинформационной системы: гидрологических, гидрохимических, пространственных и демографических, полученных их различных источников. В целях упрощения работы с данными сформированы гидрологические и гидрохимические базы данных:

- «Гидрохимические показатели р. Белая и ее притоков»;
- «Основные характеристики поймы р. Белая и ее основных притоков».

2. Приведены методы, используемые в работе:

- геостатистический метод определения расходов воды в реках на основе цифровой модели рельефа (метод корреляции карт);
- метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока;
- фрактальный анализ гидрографической сети водосборного бассейна в пяти масштабах.

3. При апробации метода корреляции карт на исследуемом водосборе обоснован выбор ординарного кригинга, как метода интерполяции для исследуемого водосборного бассейна р. Уфа. Рассмотрены критерии точности при выборе модели, которая наиболее точно интерполирует значения. Установлено, что для исследуемых 25 постов, расположенных на территории водосбора р. Уфа, моделирование поверхностей интерполяции с использованием функции сферической вариограммы показало большую достоверность (Приложение А).

4. Подробно изложен метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока. Раскрыто наибольшее совпадение слоя синтетических рек зафиксировано со слоем гидрографии в масштабе 1:200 000.

5. Приведено описание особенностей работы 6 программ для расчёта фрактальной размерности на методом box- counting, находящихся в открытом доступе: FrakOut!, HarFA, Frac, ImageJ, Fraclac, QGIS (Minkowski dimension calculator).

Глава 3. Определение расходов воды в реках водосборной территории с недостаточной гидрологической изученностью

Определение рисков истощения и загрязнения водных ресурсов имеет некоторые трудности при реализации, в частности, дефицит данных сети наблюдений о расходах воды в реках. В целях восполнения данных о расходах в створах, неохваченных гидрологическими наблюдениями, в настоящей главе рассмотрены методы прогнозирования расходов и их результаты. В настоящей главе представлены результаты выбора створа - аналога с помощью геостатистического метода корреляции карт, основанного на интерполяции. Схематично метод представлен на рисунке 3.1.

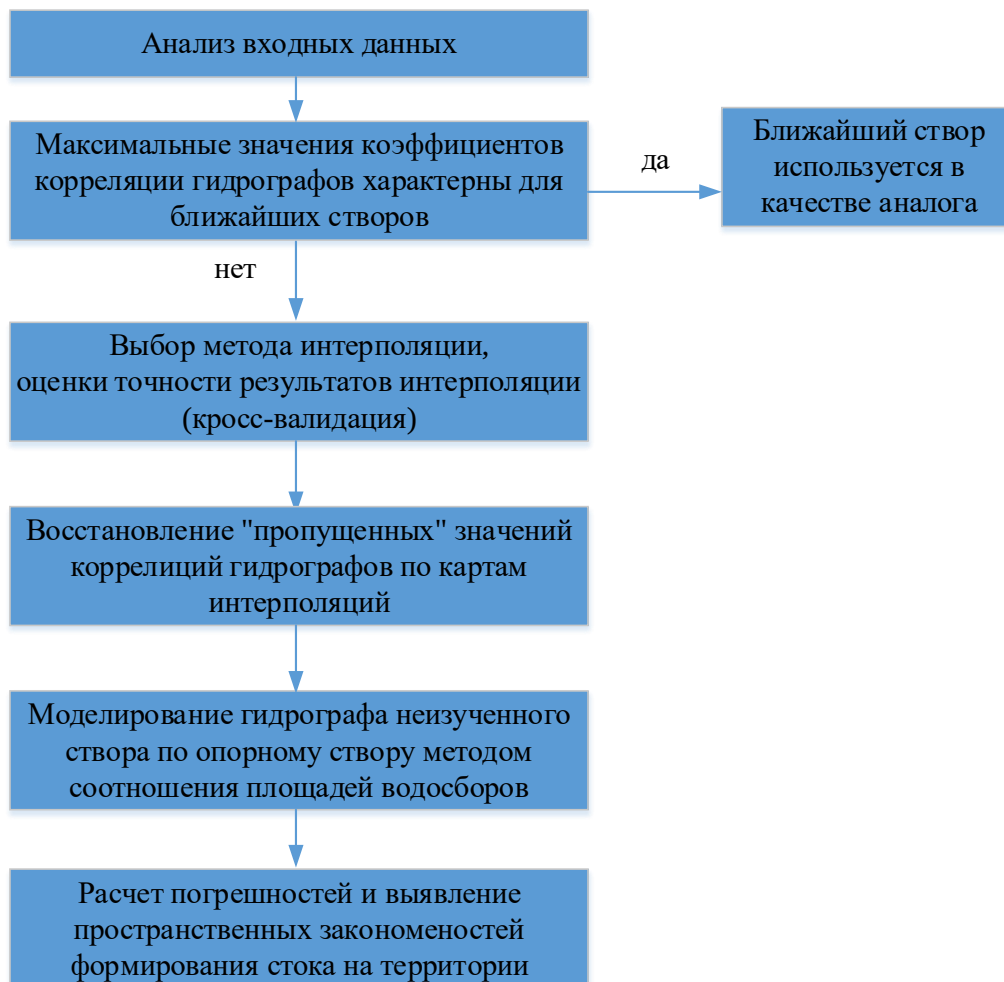


Рисунок 3.1– Схема метода корреляции карт

Методика апробирована для прогнозирования на регион большой площади с малым количеством гидрометеорологических створов.

3.1 Моделирование ежедневных расходов воды на водосборах неохваченных наблюдениями методом корреляции карт

На начальном этапе согласно методике, описанной в Главе 2, анализировались исходные данные, в частности продолжительность совместных наблюдений для каждой пары створов в пределах водосборной территории р. Уфа. В таблице 3.1 на пересечении строки и столбца с названием створов указано количество лет совместных наблюдений.

Как видно из таблицы 3.1 для пары створов UN- АМ период совместных наблюдений составил 25 лет, для пары AZ - JV – 14 лет. Для пар КК-AZ и КК-JJ не существовало совместного периода наблюдений, для пары створов КК-JE общий период наблюдения составил всего один год. Метод корреляции карт не регламентирует продолжительность периода совместных наблюдений, однако, чем длиннее временные ряды исследуемых пар створов, тем выше достоверность полученных значений корреляций в исследуемом регионе.

Следующим этапом в методе корреляции карт являлась проверка взаимосвязи коэффициента корреляции гидрографов исследуемых створов и расстояния между ними. Прямая зависимость между расстоянием и корреляцией означала бы, что пространственная близость является хорошим критерием для выбора опорного створа, иными словами выбор ближайшего к неизмеренной территории створа – будет створ с наибольшей корреляцией, то есть отсутствуют необходимость в применении метода. Слабая зависимость или ее отсутствие означали бы, что выбор створа-аналога, на основе пространственной близости, недостоверный и нужно перейти к методу корреляции карт.

Для того, чтобы исследовать зависимость между расстоянием и корреляцией, каждый створ по очереди принимался за опорный. Между

опорным и остальными створами, на исследуемой территории, определялось Евклидово расстояние по прямой и рассчитывался коэффициент корреляции r на основе ежедневных временных рядов расходов рек.

Для вычисления количества неповторяющихся пар створов использована формула биномиального коэффициента

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (3.1)$$

Где n - количество элементов в наборе, k - количество элементов в каждой комбинации.

Для водосбора реки Уфы общее количество измерителей потока составляет 25 (n), а элементы пары - 2 (k) общее количество неповторяющихся пар составляет 300.

Значения корреляций рассчитаны на основе более 197 000 о ежедневных расходах воды. Полученные значения корреляции представлены в таблице Приложение В.

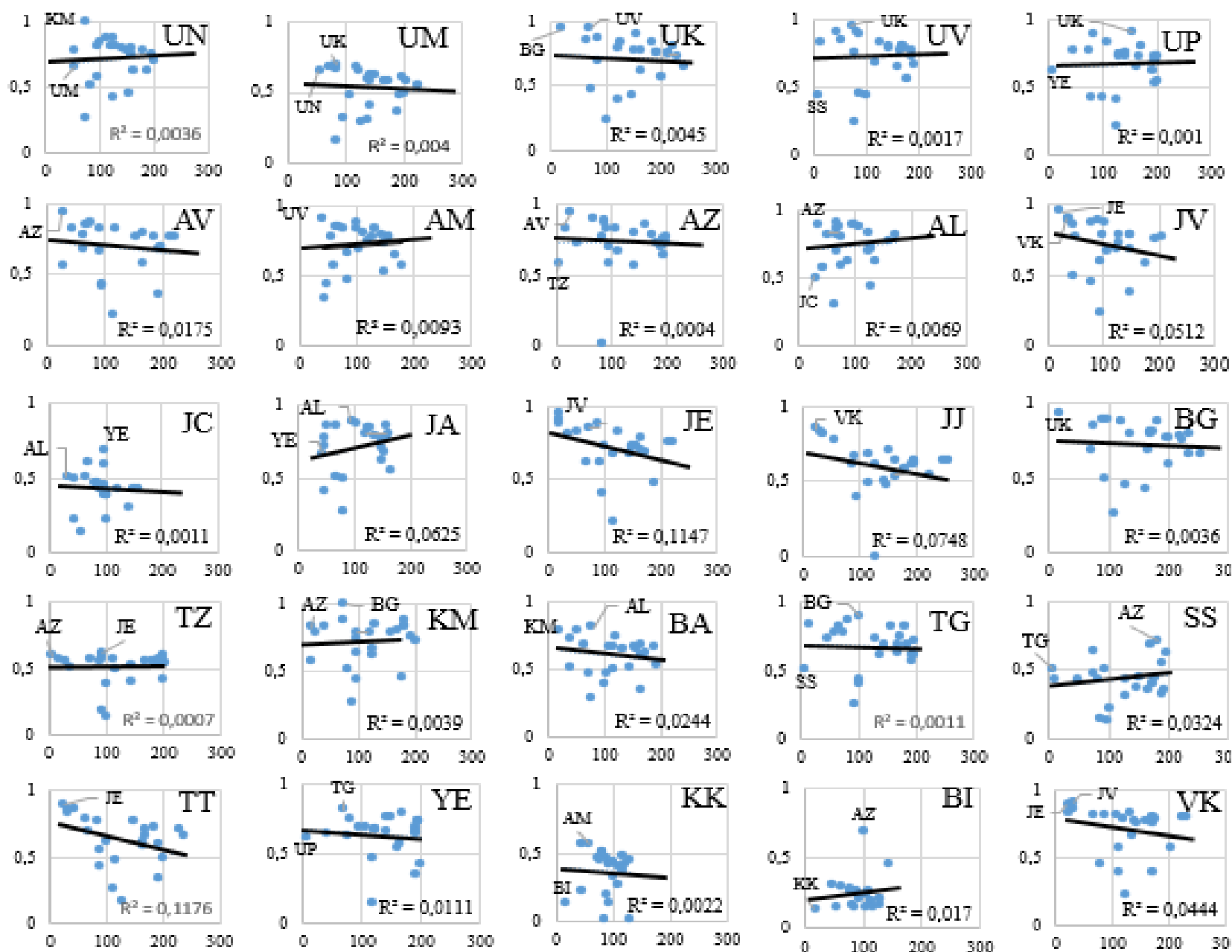
Таблица 3.1 – Общее количество лет совместных наблюдений для каждой пары гидрологических створов

Створы	UN	UM	UK	UV	UP	AV	AM	AZ	AL	JV	JC	JA	JE	JJ	BG	TZ	KM	BA	TG	SS	TT	YE	KK	BI	VK
UN	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
UM	19	19	19	19	19	19	19	11	19	19	19	19	12	6	19	14	16	19	19	19	19	14	8	19	19
UK	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
UV	22	19	22	22	22	22	22	14	22	22	22	22	15	9	22	17	22	22	22	22	22	16	8	22	22
UP	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
AV	22	19	22	22	22	22	22	14	22	22	22	22	15	9	22	17	22	22	22	22	22	16	8	22	22
AM	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
AZ	17	11	17	14	17	14	17	17	17	14	17	17	17	9	17	17	15	17	17	17	15	9	0	17	14
AL	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
JV	22	19	22	22	22	22	22	14	22	22	22	22	15	9	22	17	22	22	22	22	22	16	8	22	22
JC	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
JA	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
JE	18	12	18	15	18	15	18	17	18	15	18	18	18	9	18	18	16	18	18	18	16	10	1	18	15
JJ	9	6	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	4	0	9	9
BG	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
TZ	20	14	20	17	20	17	20	17	20	17	20	20	18	9	20	20	18	20	20	20	18	12	3	20	17
KM	23	16	23	22	23	22	23	15	23	22	23	23	16	9	23	18	23	23	23	23	23	16	8	23	22
BA	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
TG	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
SS	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
TT	23	19	23	22	23	22	23	15	23	22	23	23	16	9	23	18	23	23	23	23	23	16	7	23	22
YE	16	14	16	16	16	16	16	9	16	16	16	16	10	4	16	12	16	16	16	16	16	16	7	16	16
KK	8	8	8	8	8	8	8	0	8	8	8	8	1	0	8	3	8	8	8	8	7	7	8	8	8
BI	25	19	25	22	25	22	25	17	25	22	25	25	18	9	25	20	23	25	25	25	23	16	8	25	22
VK	22	19	22	22	22	22	22	14	22	22	22	22	15	9	22	17	22	22	22	22	22	16	8	22	22

Связь между расстоянием и коэффициентом корреляции r , для исследуемых створов, графически интерпретирована на рисунке 3.2. Согласно полученным графикам, для створов исследуемой водосборной территории характерна слабая зависимость между расстоянием и коэффициентом корреляции. Створы с наибольшей корреляцией из числа ближайших составили всего 25% от общей выборки (UM-UN, AV-AZ, AM-UV, JE-JV, JJ-VK, BG-UK, BA-KM и ТТ-JE). Важно отметить, что для всех рассматриваемых графиков отсутствует прямая зависимости между коэффициентом корреляции и расстоянием, разделяющим гидрологические створы. В этой связи, для исследуемой территории принцип подбора ближайшего створа, в качестве эталонного не является универсальным.

Представленные на рисунке 3.2 зависимости доказали, что выбор ближайших створов в качестве эталонных не обеспечивает самых высоких значений коэффициентов корреляции между гидрографами. Поэтому в настоящей работе для определения опорных створов (створов - аналогов) предложено использовать метод корреляции карт (описание приведено в Главе 2) основанный на геостатистике, в котором опорные створы выбираются по принципу наибольшей корреляции гидрографов замыкающих створов водосборов, неохваченными наблюдениями.

Коэффициент корреляции и Пирсона r (гидрографов в исследуемых створах)



Расстояние между исследуемыми створами, км

Построению поверхности интерполяции предшествует анализ распределения данных. Методы интерполяции, используемые для построения поверхности, дают лучшие результаты при нормальном распределении данных (гистограмма в форме колокола). Для этого исследованы наборы значений корреляций гидрографов относительно каждого из 25 опорных створов. На рисунке 3.3 представлено распределение корреляций 24 исследуемых створов по отношению к створу AZ, построенное с помощью ArcGIS инструментов Geostatistical Analyst, опция Гистограмма. В целом, важной характеристикой распределения является центральное значение, его размах и симметрия. Для быстрой проверки характера распределения достаточно сверить среднее значение выборки и медиану. Если они имеют приблизительно одно и то же значение, то данные подчиняются закону нормального распределения.

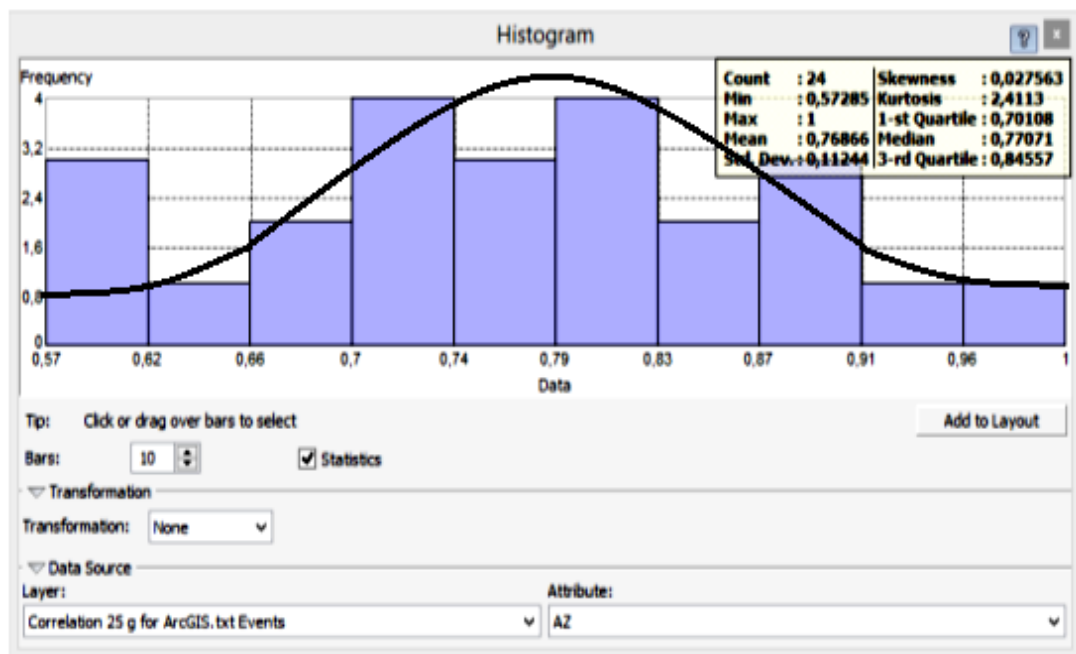


Рисунок 3.3 – График гистограммы частот для атрибутов в наборе исследуемом данных

В таблице 3.2 представлены средние значения и медианы выборки соответственно для каждого опорного створа.

Таблица 3.2 – Среднее значения выборок и медианы для каждого опорного створа

Опорный створ	Среднее	Медиана
UN	0,7250	0,7820
UM	0,5465	0,5777
UK	0,7254	0,7649
UV	0,7336	0,7837
UP	0,6751	0,7155
AV	0,7058	0,7711
AM	0,7268	0,7777
AZ	0,7687	0,7707
AL	0,7408	0,8079
JV	0,7272	0,7788
JC	0,4494	0,4320
JA	0,7245	0,7791
JE	0,7278	0,7403
JJ	0,6488	0,6383
BG	0,7352	0,7784
TZ	0,5305	0,5579
KM	0,7250	0,7820
BA	0,6176	0,6584
TG	0,6879	0,7049
SS	0,4552	0,4350
TT	0,6427	0,6641
YE	0,6512	0,6829
KK	0,4209	0,4284
BI	0,2815	0,2389
VK	0,7285	0,7905

Очевидно, что данные имели распределение, близкое к нормальному. Это означает, что в наборе данных нет экстремальных (или ошибочных) атрибутивных значений опорных точек и ошибки интерполяции должны быть минимальными.

Кроме гистограмм, еще одним тестом на нормальность распределения является QQ- график, или график Квантиль-Квантиль, который позволяет сравнить распределение исследуемой переменной с теоретическим нормальным распределением [190]. Точки нормального графика КК дают представление об одномерной нормальности набора данных. Если данные распределены нормально, точки выстраиваются на базовой линии, проходящей под углом 45 градусов. Если

данные не распределены нормально, точки отклоняться от базовой линии. В качестве примера на рисунке 3.4 представлен график КК распределения значений корреляций створа р. Ай - г. Златоуст со всеми 24 исследуемыми створами. Значения квантилей стандартного нормального распределения наносились на ось X нормального графика КК, а соответствующие значение квантилей набора данных — на ось Y.

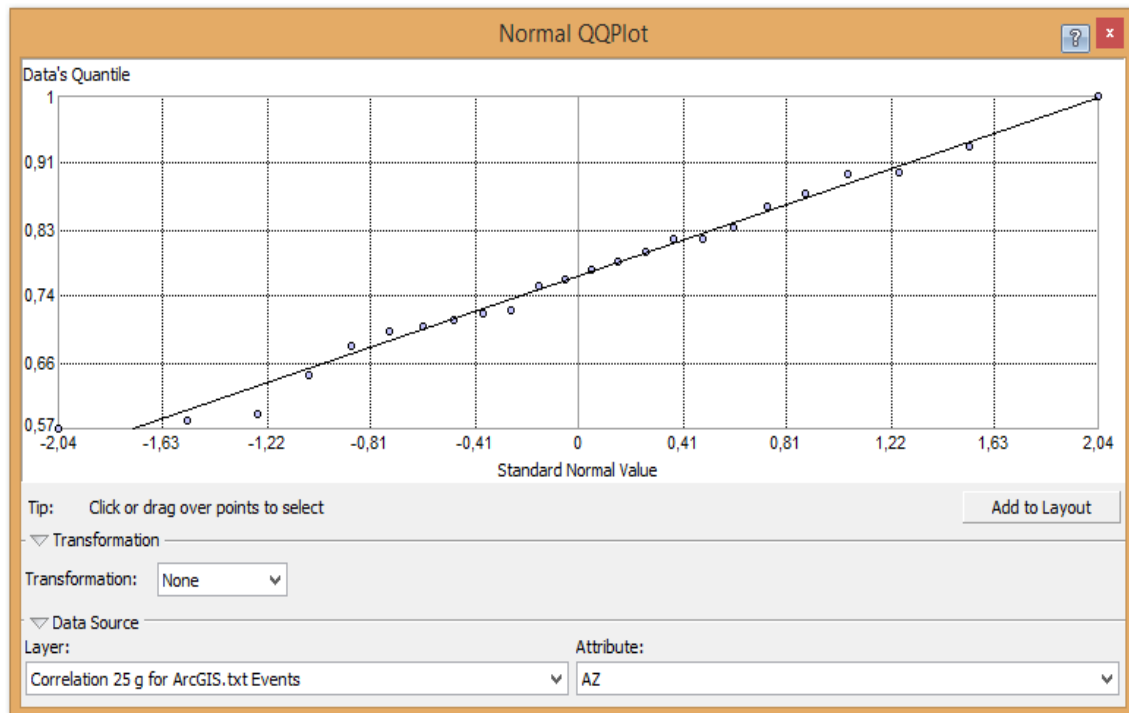


Рисунок 3.4 – График КК распределения значений корреляций створа
р. Ай - г. Златоуст с 24 исследуемыми створами

На графике (рисунок 3.4) видно, что точки расположены близко к 45-градусной базовой линии. Построение графиков КК подтверждает нормальное распределение исследуемых данных корреляции гидрографов для большинства исследуемых створов.

Пространственное распределение коэффициентов корреляции, рассчитанных от опорного створа UV представляет рисунок 3.5. Как видно из рисунка 3.5 створы TG и SS являются ближайшими к UV, но не обладают наибольшим значением корреляции. Самое высокое значение коэффициента

корреляции характерно для створов UV и UK и составило $= 0,95$, однако данные створы не являются ближайшими.

Анализ значений пространственной корреляции, графически интерпретированной на рисунке 3.5, показал, что даже если створ с наибольшим значением r не был ближайшим, то он был одним из самых близких по отношению к исследуемому.

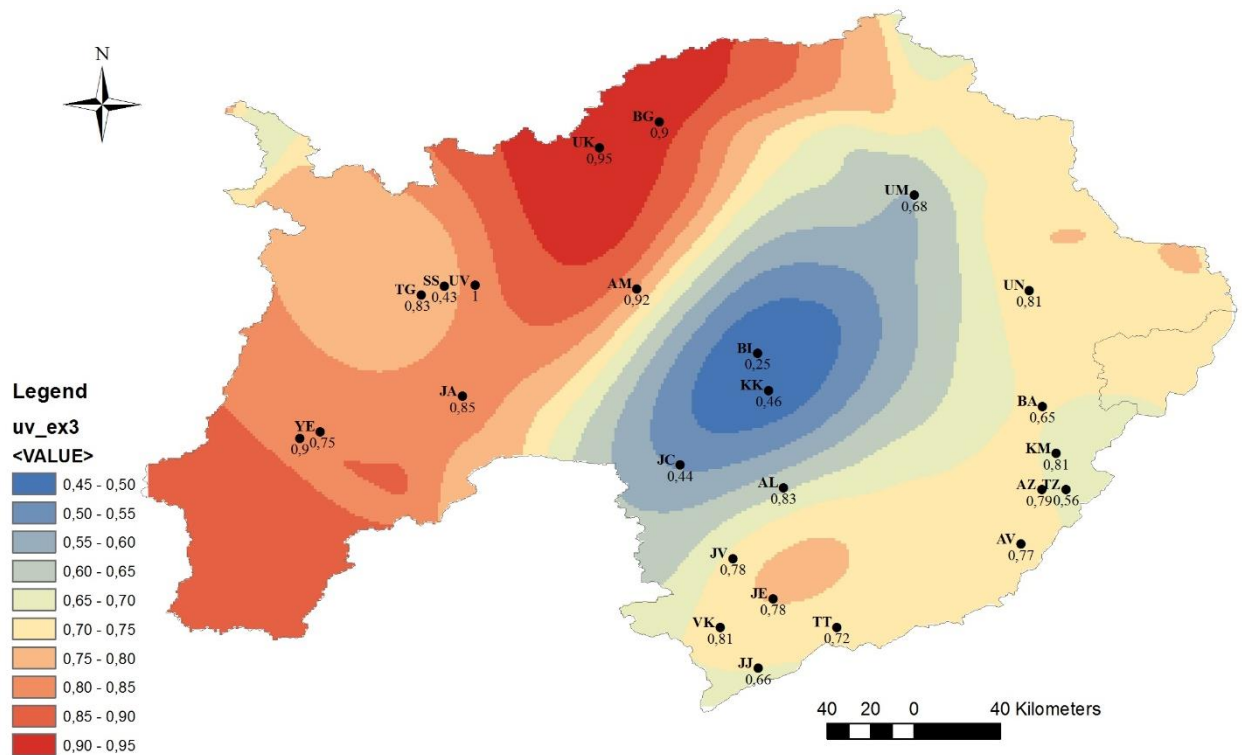


Рисунок 3.5 – Пространственное распределение коэффициента корреляции относительно опорного створа UV

Построение поверхности пространственного распространения корреляций производилось при помощи ординарного кригинга, согласно стандартной методике [164] с использованием функции «Optimize model», что предоставило возможность оптимизировать параметры выходных данных диапазона моделей интерполяции.

Если корреляция между набором створов и неисследованными водосборными территориями может быть надежно определена, то далее можно выбрать створ с наибольшей корреляцией в качестве эталонного.

Для получения коэффициентов смоделированной корреляции гидрографов рек (r_{mod}) для 25 створов построено 600 карт интерполированных поверхностей. Общее количество построенных карт рассчитывалось как $N = n^2 - n$, где n – общее количество створов на исследуемой территории. Построенные карты позволяют выделить зоны гидрологической однородности. Для примера на рисунке 3.6. приведены карты смоделированной корреляции гидрографов рек.

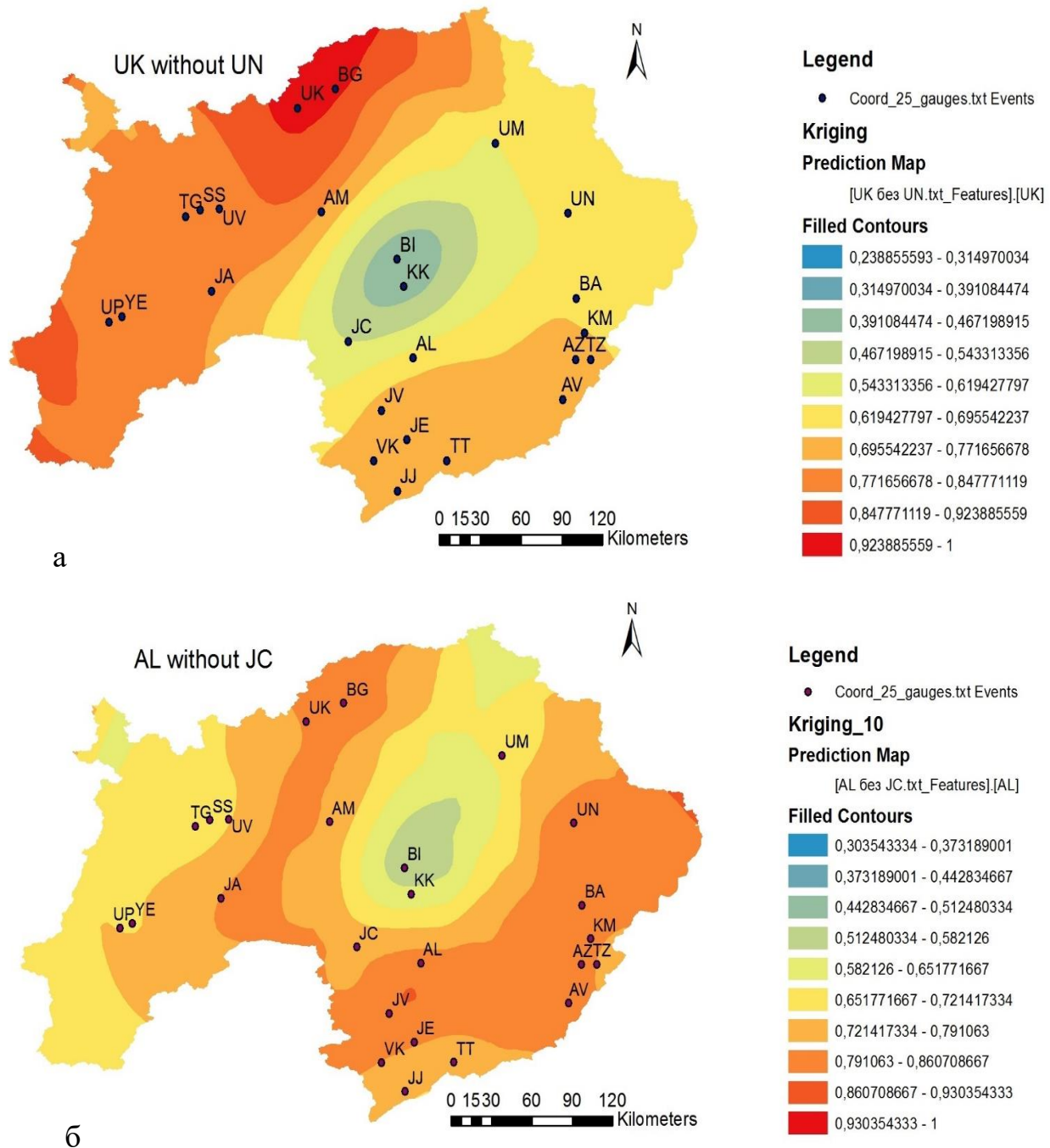


Рисунок 3.6 – Карта пространственной интерполяции коэффициентов корреляции для водосборной территории реки Уфа

а) ближайший створ обладал наибольшим значением корреляции; UK – опорный пункт, UN- «неизмеренный»

б) ближайший створ не обладал наибольшим значением корреляции; AL- опорный створ, JC – «неизмеренный»

Результаты значений r_{mod} представлены в виде матрицы смоделированных коэффициентов корреляции в таблице 3.3. Для каждого из 25 исследуемых створов на основе метода соотношения площадей (формула 2.11) рассчитано значение среднегодового расхода.

Расчет расхода воды в створе происходил следующим образом. Створ X принимался как «неизмеренный» и определялось отношение его площади ко всем остальным 24 исследуемым водосборам аналогам. Полученные соотношения поочередно умножались на значения среднегодовых расходов воды в соответствующих створах аналогов. Таким образом определены гидрографы всех исследуемых створов. Относительные погрешности между реальным и смоделированными значениями среднегодовых расходов, представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.3 - Матрица коэффициентов смоделированной корреляции гидрографов ежедневных расходов воды, полученная в результате пространственной интерполяции r_{mod}

Створы	UN	UM	UK	UV	UP	BG	YE	AV	AM	AZ	AL	TZ	KM	BA	KK	BI	JV	JC	JA	JE	JJ	TT	VK	TG	SS
UN	1,00	0,62	0,67	0,69	0,60	0,71	0,55	0,66	0,72	0,78	0,81	0,51	0,76	0,99	0,42	0,30	0,65	0,38	0,67	0,57	0,52	0,48	0,64	0,64	0,38
UM	0,78	1,00	0,60	0,61	0,64	0,69	0,65	0,73	0,73	0,78	0,80	0,56	0,82	0,73	0,49	0,30	0,71	0,35	0,71	0,68	0,58	0,48	0,60	0,69	0,34
UK	0,81	0,61	1,00	0,85	0,67	0,84	0,68	0,76	0,72	0,73	0,82	0,57	0,81	0,68	0,44	0,27	0,76	0,43	0,80	0,76	0,59	0,65	0,77	0,77	0,48
UV	0,67	0,49	0,71	1,00	0,66	0,72	0,70	0,58	0,72	0,74	0,63	0,56	0,67	0,49	0,43	0,28	0,57	0,35	0,64	0,72	0,64	0,50	0,60	0,73	0,63
UP	0,76	0,44	0,77	0,76	1,00	0,80	0,91	0,70	0,72	0,73	0,69	0,47	0,73	0,65	0,42	0,28	0,70	0,69	0,71	0,67	0,56	0,59	0,76	0,80	0,60
BG	0,74	0,64	0,90	0,89	0,82	1,00	0,77	0,77	0,73	0,72	0,77	0,56	0,74	0,65	0,42	0,28	0,77	0,44	0,82	0,74	0,62	0,65	0,79	0,73	0,46
YE	0,72	0,58	0,87	0,86	0,91	0,81	1,00	0,71	0,72	0,77	0,72	0,55	0,72	0,56	0,43	0,28	0,74	0,42	0,79	0,72	0,65	0,71	0,76	0,78	0,51
AV	0,75	0,52	0,70	0,72	0,66	0,72	0,59	1,00	0,72	0,78	0,79	0,70	0,75	0,67	0,43	0,33	0,79	0,48	0,74	0,83	0,65	0,74	0,76	0,66	0,52
AM	0,61	0,51	0,64	0,66	0,61	0,64	0,60	0,56	1,00	0,76	0,63	0,43	0,61	0,51	0,42	0,27	0,57	0,30	0,63	0,52	0,56	0,48	0,57	0,59	0,38
AZ	0,79	0,53	0,70	0,71	0,64	0,74	0,61	0,77	0,70	1,00	0,74	0,71	0,79	0,69	0,43	0,28	0,74	0,41	0,70	0,70	0,56	0,63	0,72	0,68	0,43
AL	0,60	0,42	0,55	0,60	0,55	0,56	0,60	0,63	0,72	0,76	1,00	0,42	0,60	0,52	0,41	0,29	0,70	0,57	0,65	0,75	0,59	0,59	0,64	0,52	0,34
TZ	0,85	0,58	0,76	0,77	0,68	0,80	0,66	0,88	0,73	0,79	0,87	1,00	0,85	0,77	0,48	0,32	0,83	0,49	0,80	0,84	0,66	0,70	0,80	0,72	0,46
KM	0,75	0,52	0,67	0,69	0,62	0,71	0,59	0,75	0,70	0,79	0,78	0,68	1,00	0,75	0,42	0,31	0,73	0,44	0,71	0,70	0,55	0,60	0,70	0,66	0,49
BA	0,84	0,59	0,77	0,76	0,68	0,82	0,62	0,80	0,72	0,80	0,82	0,64	0,88	1,00	0,42	0,31	0,78	0,44	0,76	0,75	0,61	0,63	0,77	0,72	0,46
KK	0,73	0,48	0,55	0,75	0,68	0,57	0,45	0,72	0,73	-	0,75	0,43	0,73	0,62	1,00	0,28	0,52	0,46	0,73	0,37	0,48	0,36	0,51	0,54	0,39
BI	0,74	0,54	0,61	0,75	0,67	0,75	0,64	0,73	0,74	0,78	0,76	0,44	0,74	0,63	0,43	1,00	0,74	0,44	0,74	0,48	0,52	0,41	0,58	0,67	0,38
JV	0,70	0,50	0,70	0,71	0,65	0,71	0,64	0,76	0,72	0,90	0,73	0,54	0,70	0,61	0,42	0,30	1,00	0,62	0,78	0,92	0,70	0,77	0,83	0,62	0,42
JC	0,69	0,53	0,65	0,69	0,62	0,68	0,52	0,69	0,74	0,90	0,77	0,46	0,69	0,62	0,49	0,29	0,75	1,00	0,72	0,73	0,65	0,60	0,71	0,62	0,40
JA	0,73	0,50	0,78	0,77	0,70	0,77	0,73	0,66	0,72	0,76	0,67	0,53	0,73	0,57	0,42	0,28	0,67	0,53	1,00	0,71	0,58	0,57	0,70	0,74	0,62
JE	0,71	0,54	0,74	0,74	0,69	0,74	0,65	0,80	0,73	0,79	0,79	0,56	0,71	0,60	0,42	0,29	0,91	0,44	0,80	1,00	0,85	0,90	0,90	0,65	0,40
JJ	0,71	0,51	0,75	0,76	0,71	0,73	0,66	0,82	0,73	0,82	0,80	0,58	0,71	0,62	0,43	0,27	0,90	0,43	0,82	0,90	1,00	0,89	0,92	0,67	0,41
TT	0,73	0,52	0,72	0,74	0,69	0,73	0,64	0,81	0,72	0,80	0,74	0,57	0,73	0,64	0,45	0,32	0,88	0,52	0,80	0,91	0,85	1,00	0,86	0,68	0,51
VK	0,67	0,52	0,68	0,74	0,66	0,69	0,63	0,75	0,73	0,80	0,76	0,54	0,67	0,58	0,42	0,28	0,87	0,48	0,77	0,90	0,88	0,83	1,00	0,62	0,46
TG	0,63	0,48	0,70	0,73	0,69	0,68	0,70	0,58	0,72	0,74	0,63	0,54	0,63	0,53	0,44	0,28	0,58	0,36	0,71	0,72	0,64	0,52	0,60	1,00	0,60
SS	0,81	0,63	0,90	0,91	0,82	0,89	0,74	0,74	0,85	0,74	0,73	0,55	0,81	0,64	0,44	0,28	0,74	0,44	0,81	0,73	0,64	0,67	0,78	0,91	1,00

Таблица 3.4 – Ошибки при определении среднегодовых значений расходов рек, δ %

	UN	UM	UK	UV	UP	BG	YE	AV	AM	AZ	AL	TZ	KM	BA	KK	BI	JV	JC	JA	JE	JJ	TT	VK	TG	SS
UN	0,00	6,91	3,44	5,21	4,72	11,19	407,34	1,43	14,44	8,76	11,36	36,13	45,19	12,44	16,61	10,11	33,74	30,49	24,44	35,16	64,24	56,69	52,23	23,46	30,51
UM	6,47	0,00	9,68	1,59	10,88	16,93	374,54	7,81	7,04	14,66	17,10	40,26	48,74	18,11	9,07	2,99	38,03	34,99	29,33	39,36	66,55	59,49	55,32	28,41	35,00
UK	3,56	10,72	0,00	8,96	1,33	8,02	425,40	2,08	18,51	5,51	8,21	33,86	43,24	9,33	20,76	14,03	31,38	28,02	21,75	32,86	62,97	55,14	50,53	20,73	28,04
UV	4,95	1,62	8,22	0,00	9,44	15,59	382,21	6,32	8,77	13,28	15,76	39,29	47,91	16,78	10,83	4,65	37,03	33,94	28,18	38,38	66,01	58,83	54,60	27,25	33,95
UP	4,96	12,21	1,35	10,43	0,00	6,78	432,48	3,45	20,11	4,23	6,97	32,96	42,48	8,11	22,39	15,56	30,46	27,05	20,69	31,95	62,47	54,54	49,86	19,67	27,07
BG	12,59	20,38	8,72	18,46	7,28	0,00	471,24	10,98	28,85	2,74	0,20	28,08	38,29	1,42	31,30	23,97	25,40	21,74	14,92	27,00	59,74	51,23	46,21	13,82	21,76
YE	80,29	78,93	80,97	79,26	81,22	82,49	0,00	80,57	77,44	82,02	82,53	87,41	89,20	82,74	77,02	78,30	86,94	86,30	85,11	87,22	92,95	91,46	90,58	84,91	86,30
AV	1,45	8,47	2,03	6,74	3,34	9,89	414,72	0,00	16,10	7,43	10,08	35,20	44,40	11,17	18,30	11,71	32,78	29,48	23,34	34,22	63,72	56,06	51,53	22,35	29,50
AM	12,62	6,58	15,62	8,06	16,74	22,39	343,33	13,87	0,00	20,27	22,55	44,19	52,11	23,49	1,90	3,79	42,10	39,26	33,97	43,34	68,75	62,15	58,26	33,12	39,28
AZ	9,60	17,17	5,83	15,31	4,42	2,66	456,03	8,03	25,42	0,00	2,86	30,00	39,93	4,04	27,80	20,67	27,38	23,82	17,19	28,94	60,81	52,53	47,64	16,11	23,84
AL	12,82	20,62	8,94	18,70	7,49	0,20	472,39	11,21	29,11	2,94	0,00	27,94	38,17	1,22	31,56	24,22	25,25	21,58	14,75	26,85	59,66	51,13	46,10	13,64	21,60
TZ	56,57	67,39	51,18	64,73	49,17	39,05	694,32	54,32	79,17	42,86	38,77	0,00	14,19	37,08	82,57	72,39	3,74	8,83	18,30	1,51	44,01	32,19	25,21	19,84	8,79
KM	82,46	95,07	76,19	91,97	73,84	62,05	825,68	79,84	108,80	66,48	61,72	16,54	0,00	59,75	112,76	100,90	20,89	26,82	37,87	18,30	34,76	20,97	12,84	39,65	26,79
BA	14,21	22,11	10,29	20,17	8,82	1,44	479,45	12,58	30,70	4,21	1,23	27,05	37,40	0,00	33,18	25,76	24,33	20,61	13,70	25,95	59,16	50,53	45,44	12,58	20,64
KK	14,24	8,32	17,19	9,77	18,29	23,84	335,08	15,47	1,86	21,75	23,99	45,23	53,00	24,92	0,00	5,58	43,18	40,39	35,20	44,40	69,33	62,86	59,03	34,36	40,41
BI	9,18	2,90	12,30	4,44	13,47	19,34	360,77	10,48	3,93	17,13	19,50	41,99	50,22	20,48	5,91	0,00	39,82	36,87	31,37	41,12	67,52	60,66	56,61	30,48	36,89
JV	50,93	61,36	45,74	58,80	43,80	34,05	665,72	48,77	72,72	37,71	33,78	3,60	17,28	32,15	76,00	66,18	0,00	4,91	14,04	2,15	46,03	34,63	27,90	15,52	4,88
JC	43,87	53,81	38,92	51,37	37,08	27,78	629,90	41,81	64,64	31,27	27,52	8,11	21,15	25,96	67,76	58,41	4,68	0,00	8,71	6,72	48,55	37,68	31,27	10,12	0,03
JA	32,34	41,49	27,80	39,24	26,10	17,54	571,43	30,45	51,45	20,76	17,30	15,47	27,47	15,87	54,33	45,72	12,31	8,01	0,00	14,19	52,68	42,68	36,78	1,30	8,04
JE	54,24	64,90	48,93	62,28	46,95	36,98	682,50	52,03	76,51	40,73	36,71	1,49	15,47	35,04	79,85	69,82	2,19	7,21	16,54	0,00	44,85	33,19	26,32	18,05	7,18
JJ	179,65	198,98	170,04	194,23	166,45	148,37	1318,79	175,65	220,03	155,17	147,87	78,62	53,27	144,85	226,10	207,91	85,29	94,38	11,31	81,31	0,00	21,13	33,59	114,05	94,32
TT	130,87	146,83	122,94	142,91	119,97	105,05	1071,30	127,56	164,21	110,66	104,63	47,46	26,53	102,14	169,22	154,20	52,97	60,47	74,45	49,69	17,44	0,00	10,29	76,71	60,43
VK	109,33	123,80	102,14	120,24	99,45	85,92	962,02	106,33	139,55	91,00	85,54	33,70	14,73	83,28	144,10	130,49	38,70	45,50	58,17	35,72	25,15	9,33	0,00	60,22	45,46
TG	30,65	39,68	26,16	37,46	24,48	16,04	562,83	28,78	49,51	19,21	15,80	16,55	28,39	14,39	52,35	43,85	13,44	9,19	1,28	15,29	53,28	43,41	37,59	0,00	9,21
SS	43,91	53,86	38,96	51,41	37,11	27,81	630,11	41,85	64,69	31,31	27,55	8,08	21,13	26,00	67,81	58,45	4,65	0,03	8,74	6,70	48,54	37,67	31,25	10,15	0,00

В таблице 3.3 каждый столбец соответствует опорному створу, т.е. створу, относительно которого рассчитаны корреляции для всех остальных створов, а в строке – «неизмеренные створы», т.е. створы для которых значения коэффициентов корреляции были пропущены и определены с помощью карт поверхностей проинтерполированных значений.

Аналогичным образом представлена информация в таблице 3.4. Столбцы представляют створы для которых производилось моделирование среднемноголетних значений расходов, строки – створы по которым производилось моделирование. Ячейка на пересечении столбца и строки содержала информацию об ошибке прогнозирования. Например, пересечение столбца UK и BG содержала значение 8,72. Это означает, что ошибка прогнозирования значения среднемноголетнего расхода в створе UK, на основе среднемноголетнего значения BG, составляла 8,72%.

При сопоставлении таблиц 3.3 и 3.4 очевидно, что не всегда наибольшее значение коэффициента смоделированной корреляции соответствует наименьшей ошибке. Например, створ SS составлял пары с наибольшей корреляцией для створов UV, BG, AM, а показатели ошибок - достаточно высокие 54,41%, 27,81%, 64,69% соответственно. В то время как значения коэффициентов смоделированной корреляции для створов, расположенных на р. Уфа (UN, UM, UK, UV, UP) по отношению друг к другу не являлись самыми большими из всех возможных пар, однако ошибки прогнозирования самые низкие. Это означает, что недостаточно обосновывать выбор створа - аналога только на самом высоком значении корреляции.

При прогнозировании гидрологических характеристик на малоизученных территориях важно учитывать эффект масштаба и генетической близости водосборов. Расположение водосборов с замыкающими створами на исследуемой территории представлено на плане – схеме (рисунок 3.7).

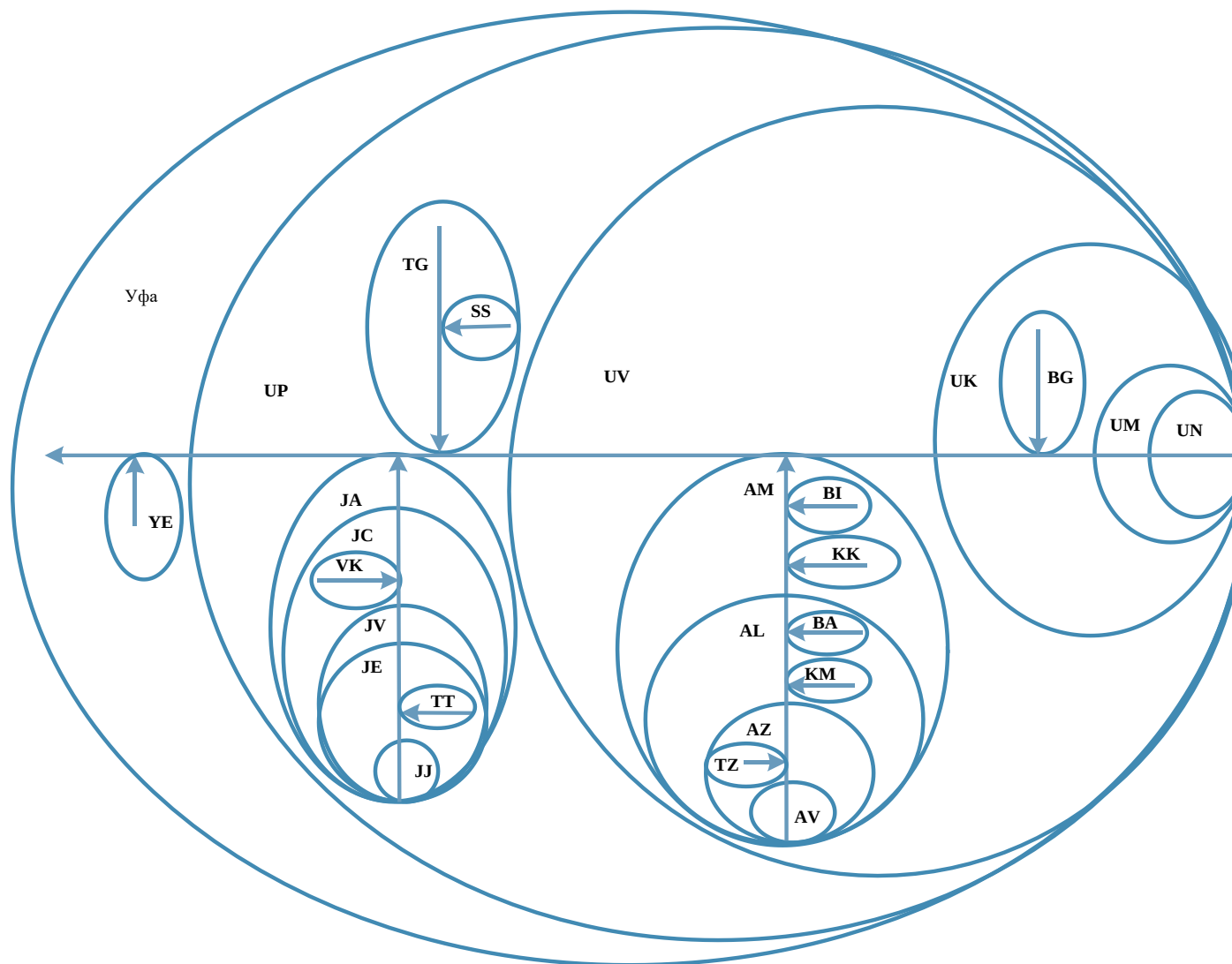


Рисунок 3.7 - План – схема водосборных бассейнов водосборной территории р. Уфа

Вопросы пространственного и временного масштаба в гидрологическом моделировании подробно рассмотрены в работах [43, 190].

Хорошо известно, что процессы, происходящие на водосборах малых рек отличаются от процессов на водосборах больших рек ввиду эффекта пространственной неоднородности и влияния многих стокоформирующих факторов. Иными словами, даже если гидрографы малой и большой рек показывают высокие значения коэффициентов корреляций, это не говорит о сходных стокоформирующих процессах, происходящих в водосборах. Зачастую, это является совпадением и водосборы не являются подобными. Выбор створов-аналогов может быть основан на максимальных значениях корреляции, но с учетом масштабов рассматриваемых водосборов, что обуславливает необходимость введения дополнительного условия при выборе створа – аналога на исследуемой территории.

В настоящем исследовании изменено базовое условие метода корреляции карт об изотропности водосборной территории.

В целях повышения достоверности прогнозирования предложено разделить бассейн р. Уфа по составным водосборам (Уфа, Ай, Юрюзань, Тюй) и находить створ – аналог по наибольшему значению коэффициентов смоделированной корреляции в рамках бассейна.

Внутри каждого бассейна створы подразделяются на главные и второстепенные. Главные – створы, расположенные на главной реке, второстепенные – створы, расположенные на притоках. В таблице 3.5 приведено условное разделение исследуемых створов на главные и второстепенные. В свою очередь водосборы рр. Ай, Юрюзань и Тюй, являются второстепенными по отношению к р. Уфа.

Таблица 3.5 – Главные и второстепенные створы бассейна р. Уфа

Водосборный бассейн	Главные створы	Второстепенные створы
Уфа	UN, UM, UK, UV, UP	BG, YE
Ай	AV, AM, AZ, AL	TZ, KM, BA, KK, BI
Тюй	TG	SS
Юрюзань	JV, JC, JA, JE, JJ	TT, VK

Базовый метод корреляции карт говорит о выборе опорного створа на основе максимального значения коэффициентов смоделированной корреляции из всей рассматриваемой выборки, не принимая в расчет масштаб и порядок водосбора. В настоящей работе для исследуемой территории предложено изменить алгоритм метода корреляции карт, а именно, сначала находить Γ_{mod} , а далее разделять территорию по водосборам и определять створ-аналог по максимальному значению смоделированной корреляцией в пределах бассейна. Причем, если «неизмеренный» створ находится на главной реке, то выбирать аналог следует из числа главных створов. Предлагаемый алгоритм поиска створа- аналога представлен в виде блок-схемы на рисунке 3.8.

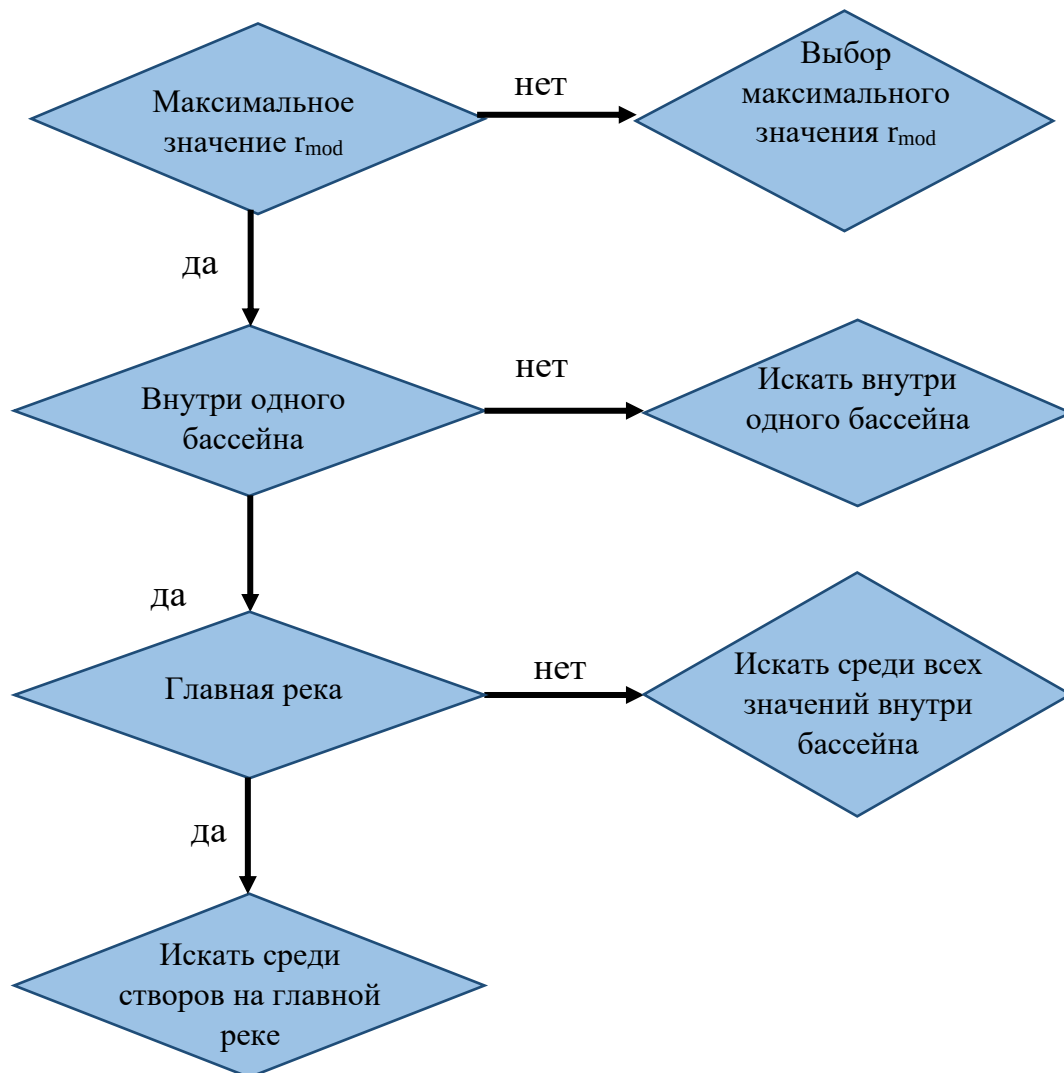


Рисунок 3.8 – Преобразованный алгоритм поиска створа- аналога по методу корреляции карт

На рисунках 3.9 и 3.10 графически интерпретированы величины относительных погрешностей и величин NSE (критерий Нэша–Сатклиффа) при выборе створов - аналогов на основе принципов пространственной близости и наибольших величин смоделированной корреляции, в том числе, с учетом разработанного алгоритма.

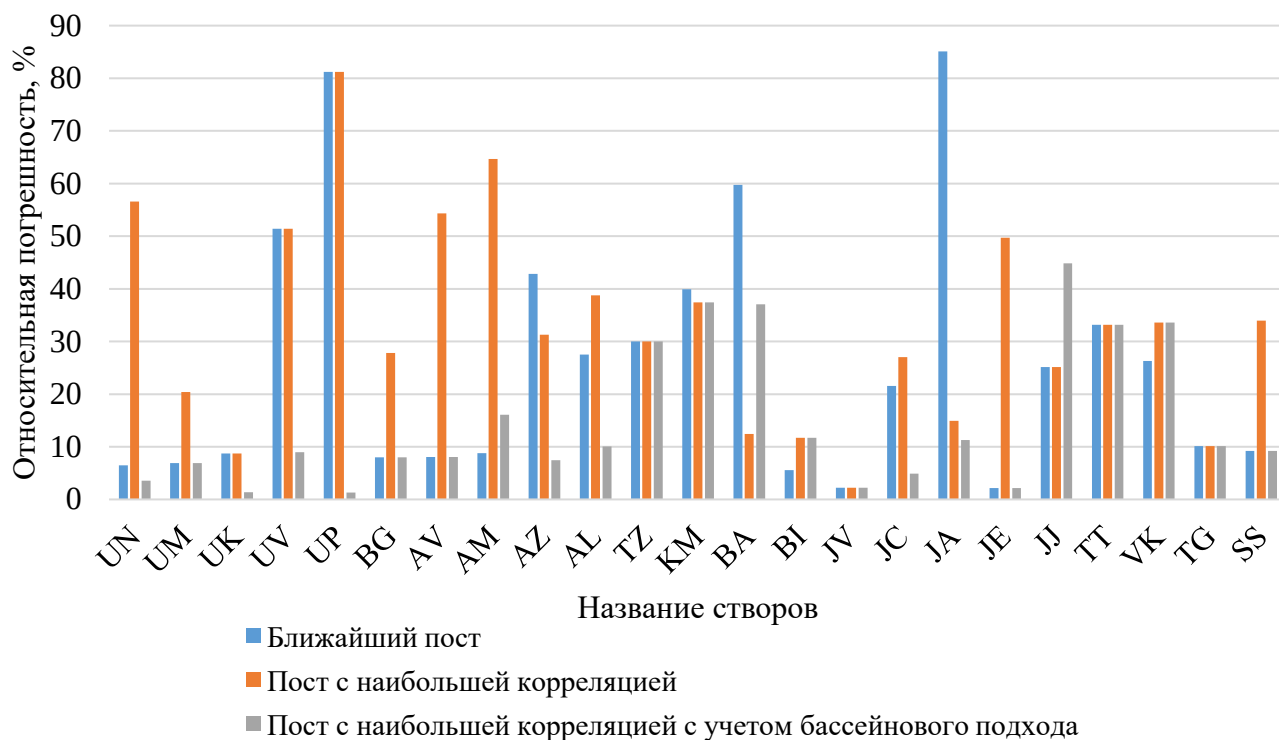


Рисунок 3.9 – Распределение величин относительных погрешностей при разных подходах к выбору створов аналогов

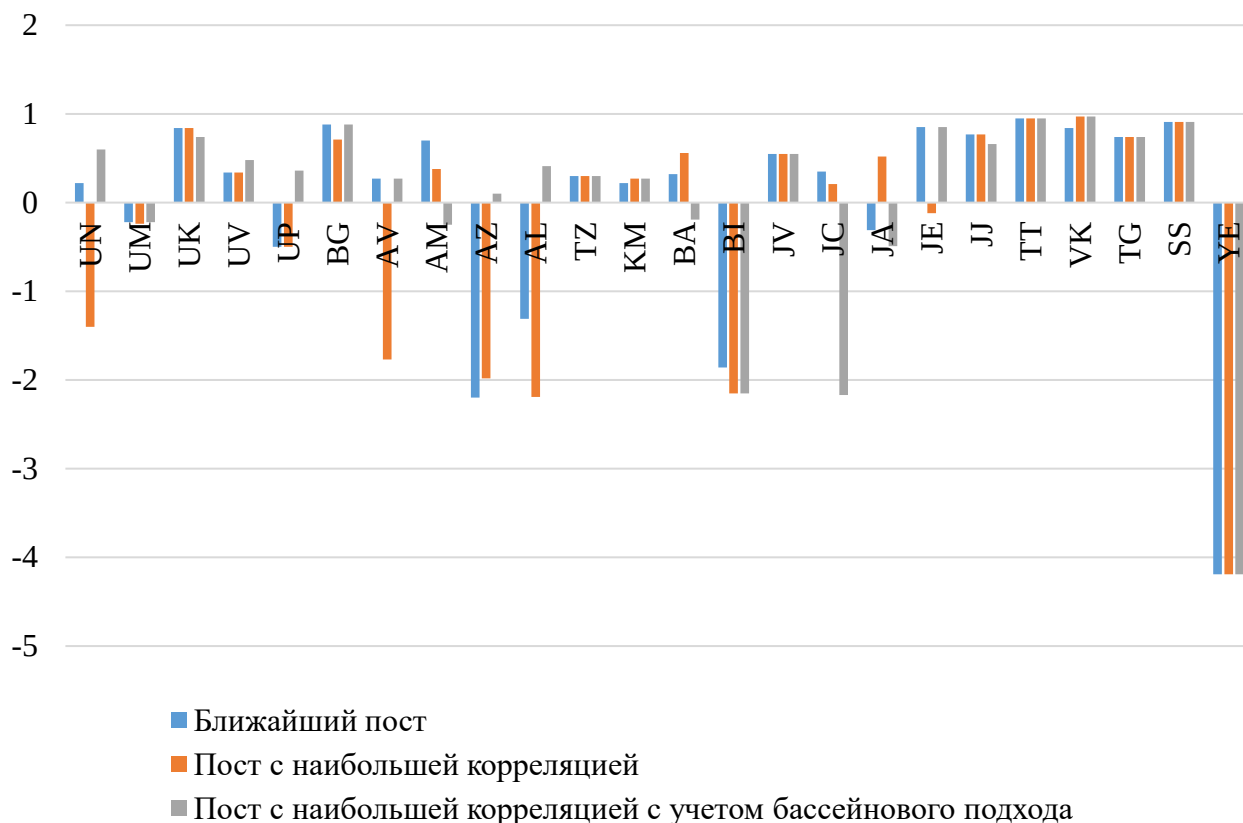


Рисунок 3.10 – Распределение величин NSE при разных подходах к выбору створов аналогов

Как видно на рисунках 3.9 и 3.10 использование предлагаемого алгоритма помогло существенно повысить достоверность прогнозирования расходов. Для большинства исследуемых створов происходило существенное снижение ошибок прогнозирования. В частности, для створов, расположенных в бассейне р. Уфа, относительная ошибка между измеренным и прогнозируемым значением не превышала 9%. Интересно, что пары створов UK-BG, UV-SS, UP-YE являлись и ближайшими и показывали наибольшие значения Γ_{mod} , однако ошибки в прогнозировании достигали 80%. В таблице 3.6 представлены результаты расчета расходов воды при выборе в качестве аналога створа с наибольшей Γ_{mod} с учетом бассейнового подхода.

Таблица 3.6 – Результаты расчета расходов вод в реках при выборе в качестве аналога створа с наибольшей r_{mod} с учетом бассейнового подхода

№	Опорный пост	Пост с наибольшей r с учетом бассейнового подхода	δz , %	Площадь водосборов рек	ГОСТ 19179-73 Гидрология суши Термины и определения.
1	UN	UK	3,56	53 100	Большие реки
2	UM	UN	6,91	53 100	
3	UK	UP	1,35	53 100	
4	UV	UK	8,96	53 100	
5	UP	UK	1,33	53 100	
6	AV	AZ	8,03	15 000	Средние реки
7	AM	AV	16,10	15 000	
8	AZ	AV	7,43	15 000	
9	AL	AV	10,08	15 000	
10	JV	JE	2,19	7 240	
11	JC	JV	4,91	7 240	
12	JA	JJ	11,31	7 240	
13	JE	JV	2,15	7 240	
14	JJ	JE	44,85	7 240	
15	BG	UK	8,02	3 400	
19	TG	SS	10,15	3700	
16	TZ	AZ	30,00	147	Малые реки
17	KM	BA	37,40	621	
18	BA	TZ	37,08	910	
20	SS	TG	9,21	1 370	
21	TT	JE	33,19	150	
22	YE	UP	452,80	721	
23	KK	TZ	82,57	1 370	
24	BI	AV	11,71	1 460	
25	VK	JJ	33,59	1 100	

В бассейне р. Ай применение нового алгоритма выбора створа-аналога способствовало снижению ошибок прогнозирования для створов: AZ, AL, KM, BA, однако, в некоторых отдельных случаях, ошибка достигала 38%. В створах AM и BI использование нового подхода приводило к незначительному увеличению ошибок максимум до 30%.

Для бассейна р. Юрюзань сложно дать однозначное заключение о положительном эффекте предлагаемого алгоритма выбора створов – аналогов на результаты прогнозирования. Снижение значений ошибки очевидно только для

створа JC. В случае водосбора VK выбор створа- аналога в пределах бассейна р. Ай способствовал увеличению ошибки с 26 % до 33,59 %.

Водосборная территория р. Тюй располагает всего двумя гидрометеорологическими створами, однако для створа SS бассейновый подход при выборе створа – аналога способствовал сокращению ошибки до 10,15 %.

Особо выделялись пары створов TZ-AZ, JV-JE, TT-JE, TG-SS, которые удовлетворяли сразу трем условиям: являлись ближайшими, обладали наибольшими значениями корреляции, в том числе, внутри одного водосборного бассейна.

Интересным являлось и то, что некоторые пары створов одновременно удовлетворяли двум условиям. Например, пары створов UM-UN, AV-AZ, JE-JV, SS-TG являлись одновременно и ближайшими по отношению друг к другу, и показывали максимальные значения коэффициентов смоделированной корреляции при бассейновом подходе. Ближайшие створы UK-BG, UV-SS, UP-YE, JJ-VK одновременно показывали наибольшие значения r_{mod} . Исключением являлась пара створов YE-UP,

Эта пара створов, очевидно, относится к грубым погрешностям метода. Из таблицы 3.4 видно, что ошибки характерные для створа YE лежат в диапазоне от 361 до 1319 %. Яманелга при площади водосбора в 718 м² имеет в устье аномально низкий среднегодовой расход в 0,95 м³/с, что связано с переходом поверхностных вод в подземные. Река в 8 км от истока уходит в поноры (сток воды отмечается только в периоды снеготаяния или выпадения атмосферных осадков) [191]. Данный пример говорит о потенциале метода корреляции карт распознавать уникальные стокоформирующие территории. Если одни из створов сильно отклоняется от общей корреляционной структуры, то значит на этом водосборе есть какие-то особенности в процессах формирования стока с территории.

Из общей тенденции снижения ошибок при реализации бассейнового подхода в методе корреляции карт выбиваются створы KK-TZ. Повышение ошибок прогнозирования до 82,57% может быть связано с особенностями

поверхности интерполяции. Из таблицы 3.3 видно, что значения r_{mod} для створа КК изменяется в диапазоне 0,41-0,49. Такая малая вариация значений не может служить основой для достоверного выбора пары исходя из максимального значения корреляции. В случае створа JA следующим наибольшим значением коэффициента смоделированной корреляции обладает пара JA-JJ ($r_{\text{mod}} = 0,8$). Ошибка в прогнозировании среднесуточного значения расхода воды в JA по JJ составляет всего 11,31 %.

Как видно из рисунка 3.8, преобразование алгоритма выбора створа-аналога по методу корреляции карт приводит к повышению величины NSE. Динамика изменения NSE сходна с изменением относительной погрешности. Исключения составили створы ВА, ВІ, ЈС, где снижение ошибки сопровождалось уменьшением величины NSE. Критерий чувствителен к продолжительности ряда исследований, что подтверждено примером створа КК. Согласно данным таблицы 3.1, КК имел самый короткий временной ряд ежедневных расходов и для нескольких створов отсутствовал общий период наблюдений.

Несмотря на то, что в данной работе метод корреляции карт использовался для оценки временных рядов ежедневно речного стока на неизмеренных водосборах, метод можно использовать для решения других гидрологических задач, включая: калибровку гидрологических моделей, оценку сети гидрологических наблюдений и классификацию водосборов, а также определение избыточности существующих наблюдательной сети и необходимости запуска новых створов.

Хотя метод используется для выбора одного опорного створа, он не исключает возможности выбора более, чем одного опорного створа. Например, для ежедневных гидрографов речного стока, на неизмеренном водосборе, могут определяться коэффициенты веса по оценочной корреляции на каждом из опорных створов.

3.2 Метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока

Как показано в разделе 3.1, метод корреляции карт применительно к р. Уфа хорошо подходит при определении расходов воды в больших и средних реках, относящихся к одному подбассейну (ошибка до 16,1 %). Однако, для малых рек, достоверность метода существенно ниже (погрешность более 35%). Дополнительным методом определения расходов воды, при недостаточности данных гидрометрических наблюдений на малых реках, является определение расходов с помощью построения карты модуля стока (методика подробно изложена в Главе 2).

Для построения расхода воды для каждой точки гидрологической сети использовались растры суммарного стока и модуля стока. Так как модуль стока – это отношение расхода воды к площади водосборного бассейна, а растр суммарного стока – это площадь водосбора, выраженная в количестве пикселей. Для определения значения расхода в каждой ячейке речной сети растр суммарного стока, который имеет значения только в руслах синтетической речной сети, умножался на растр модуля стока. Далее полученное значение растра суммарного стока умножалось на размер одной ячейки для перевода результата в м³/сек (формула 3.4).

$$Q=M \cdot F / 10^3, \quad (3.3)$$

$$Q=M \cdot F \cdot c / 10^3, \quad (3.4)$$

где Q – расход воды, М –модуль стока, с – площадь ячейки поверхности [192].

Площадь ячейки определена путем деления площадей водосбора на значение ячейки в результирующем створе и составила $c = 0,0051144 \text{ м}^2$.

Умножение выполнялось с помощью инструмента «калькулятор растра». Результатом перемножения стал растр расхода воды. Достоверность метода апробирована на створах с известными значениями расхода. Результаты прогнозирования среднегодовы́х расходов воды в створах с регулярными

гидрологическими измерениями, относящимися к водосборной территории р. Уфа представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты прогнозирования среднегодовых расходов воды в створах с регулярными гидрологическими измерениями, относящимися к водосборной территории р. Уфа

№	Опорный пост	Qср. год. факт	Qср. год. расчетн.	δ , %	Площадь водосборов рек	ГОСТ 19179-73 Гидрология суши Термины и определения.
1	UN	23,79	16,84	41,29	53 100	Большие реки
2	UM	35,32	33,74	4,70	53 100	
3	UK	98,29	124,25	20,89	53 100	
4	UV	205,83	314,88	34,63	53 100	
5	UP	330,41	423,93	22,06	53 100	
6	AV	3,97	4,41	9,91	15 000	Средние реки
7	AM	82,94	116,78	28,98	15 000	
8	AZ	8,20	10,49	21,82	15 000	
9	AL	48,56	44,09	10,15	15 000	
10	JV	24,51	21,35	14,80	7 240	
11	JC	46,64	40,62	14,80	7 240	
12	JA	61,3	66,51	7,83	7 240	
13	JE	17,94	18,93	5,23	7 240	
14	JJ	3,10	2,60	19,51	7 240	
15	BG	23,71	26,04	8,97	3 400	
19	TG	19,04	20,91	8,96	3700	Малые реки
16	TZ	1,50	1,45	3,53	147	
17	KM	3,50	3,26	7,52	621	
18	BA	2,11	2,39	11,41	910	
20	SS	12,5	13,26	5,71	1 370	
21	TT	2,10	1,81	13,81	150	
22	YE	0,50	9,06	94,48	721	
23	KK	7,11	8,36	14,97	1 370	
24	BI	8,80	10,47	15,91	1 460	
25	VK	4,66	4,20	10,86	1 100	

С помощью метода геомоделирования расходов воды по значению модуля стока для 101 малой реки, полученной при сопоставлении слоя синтетических рек и слоя реальной гидрографии рек исследуемой территории, рассчитаны

значения среднегодовых расходов воды с относительной погрешностью, не превышающей 16%. Результаты расчета приведены в таблице Приложение Б.

Как видно из таблицы 3.6 метод корреляции карт применительно к большим и средним рекам (ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения) [193], относящихся к одному бассейну, показал, что относительная погрешность определения расходов воды для рек не превышает 16%.

Метод геомоделирования по значениям модуля стока (таблица 3.7) характеризуется меньшими значениями δ (не превышают 16%) при определении расходов малых рек, в то время как для больших и средних рек δ достигает 41%.

Поэтому для моделирования расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью больших и средних водосборов, охватывающих разные природные зоны, рекомендуется применять метод корреляции карт, а для малых, отражающих локальные особенности, - метод расчета расхода по модулю стока.

Результаты и выводы по главе 3

1. Апробирован метод корреляции карт на водосборной территории р. Уфа для определения водных ресурсов в поверхностных водотоках. В целях повышения достоверности прогнозных значений для больших и средних рек предложен преобразованный метод выбора створа аналога с учетом порядка рек и размера водосбора (пространственно-временного масштаба гидрологических процессов). Данный подход позволил сократить относительную погрешность определения расходов воды для рек до 16%.

2. Для рек бассейна р. Уфа апробирован метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока. Смоделированы значения среднегодовых расходов воды на территории с недостаточной гидрологической изученностью. Установлено, что при определении расходов воды в малых реках данным методом относительная погрешность не превышает 16%, для больших и средних рек δ достигает 41%. Используя метод геомоделирования расходов воды по значению модуля стока для 101 малой реки рассчитаны значения среднегодовых расходов воды.

3. Проведена модернизация существующих методик и изложен подход к прогнозированию расходов воды в реках, основанный на классификации рек по размеру, объединяющая в себе метод корреляции карт для больших и средних рек и метод геомоделирования расходов воды в реках по значениям модуля стока - для малых рек.

Глава 4. Методология определения фрактальной размерности водосборной территории

Необходимым условием рационального использования водных ресурсов и управления рисками на водосборной территории является рассмотрение рек, как компонентов окружающей среды. Качество воды в реке интегрально отражает всю совокупность природных процессов и антропогенных воздействий в пределах водосборной территории и непосредственно в гидрографической сети [194].

В настоящей работе впервые в качестве интегрального показателя, объединяющего в себе основные характеристики водосборной территории (водность территории, извилистость русел рек, количество малых рек, расход воды), предложено использовать фрактальную размерность (D).

Исследования фрактальной геометрии речных систем затруднено отсутствием единого мнения по некоторым базовым пунктам:

- достоверность фрактальной размерности в зависимости от масштаба исследуемого объекта (карты);
- изменение точности при использовании разных программ;
- влияние разрешения изображения исследуемого объекта при расчете фрактальной размерности.

Для изучения влияния этих параметров в настоящей главе проведена отработка методологии фрактального анализа на гидрографической сети бассейна р. Уфа с наиболее крупными притоками: р. Ай, р. Большой Ик, р. Сарс, р. Тюй, р. Юрюзань. Определение фрактальной размерности производились для пяти масштабов: 1: 2 000 000, 1: 1 000 000, 1: 500 000, 1: 200 000 и 1: 100 000. Далее приведены результаты расчета фрактальной размерности с помощью разных программных продуктов.

4.1 Подготовка слоя гидрографии рек для фрактального анализа

Для проведения фрактального анализа исследуемой территории построена гидрографическая сеть на основе цифровых и топографических карт. Далее с помощью ЦМР выделены границы водосборов для 9 водотоков бассейна р. Уфа.

При этом использовались карты пяти различных масштабов взятые из открытых источников:

1:2 000 000 (Open Street Map) [160],

1:1 000 000 и 1:500 000 (карты Генерального штаба СССР 1981-1987 гг.),

1:200 000 и 1:100 000 (карты, составленные Государственным научно-внедренческим центром геоинформационных систем и технологий (ФГУП Госгисцентр) 2001 г.) сканированные листы топографических карт загружались с открытого ресурса [158].

В настоящем исследовании топографические карты на бумажной основе, с помощью ГИС преобразованы в цифровые форматы. Процесс преобразования топографической карты в векторную (векторизация) представлен в виде схемы на рисунке 4.1.

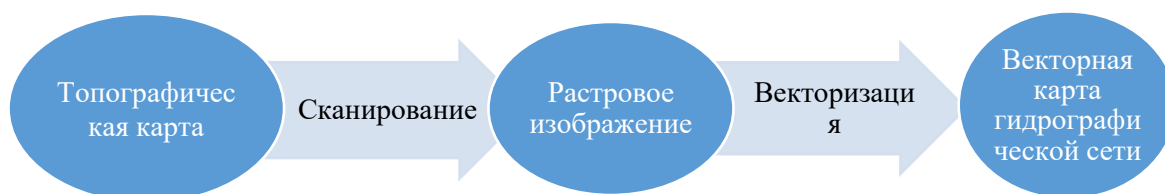


Рисунок 4.1 – Алгоритм векторизации гидрографической сети

После сканирования, с помощью стандартных функций ArcGIS осуществлялась географическая привязка полученного растрового изображения и сопоставление листов топографических карт друг с другом. Вручную оцифрованы слои гидрографии р. Уфа для каждого исследуемого масштаба. В итоге получены 5 слоев гидрографии, представленных на рисунке 4.2.

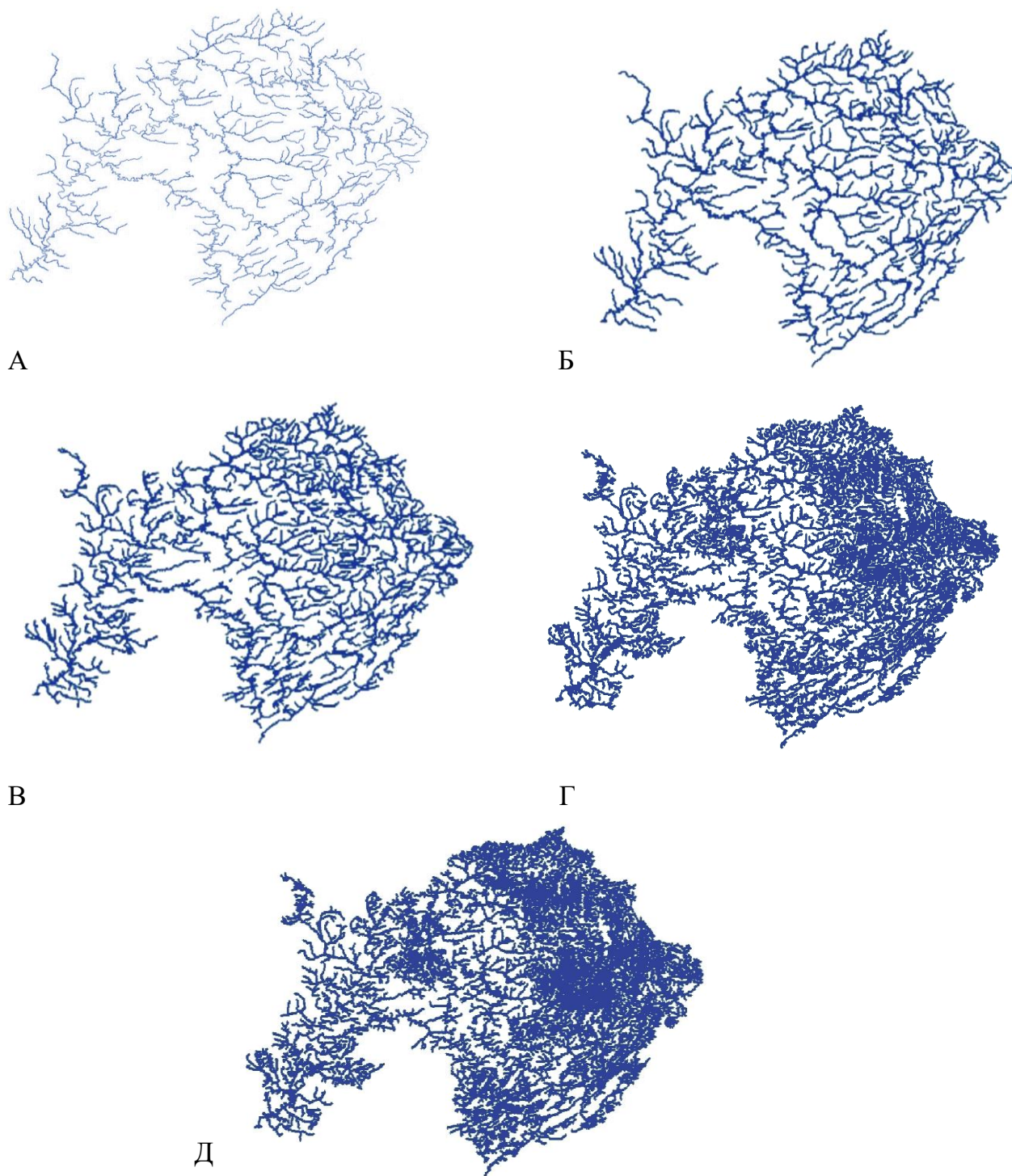


Рисунок 4.2 -Слои гидрографии бассейна реки Уфа, для масштабов
 А- 1: 2 000 000; Б - 1: 1 000 000; В- 1: 500 000; Г – 1: 200 000; Д – 1: 100 000

Как видно из рисунка 4.2 изображения крупных масштабов (1:100 000, 1: 200 000) отличаются более разветвленной структурой и большим количеством водотоков, при уменьшении масштаба, в связи с картографической

генерализацией, происходит упрощение отображаемых объектов, в частности, “сглаживается” извилистость, сокращается количество притоков.

Согласно [195] на картах масштабов 1:25000-1:200000 отображаются реки и ручьи длиной 1 см и более, а на картах масштабов 1:500000 и 1: 1000000 - 1,5 см и более. Генерализация осуществляется путём исключения рек меньше 1–1,5 см в масштабе карты, а также путём исключения мелких извилин русла, но характер извилистости русла обычно отображается. Меандры исключаются, если их диаметр менее 0,4 – 0,5 мм. В процессе генерализации сохраняются типы речных систем (решетчатые, древовидно-ветвящиеся и др.), однако «спрямление» гидрографической сети может повлиять на значение фрактальной размерности.

Для проведения фрактального анализа гидрографическая сеть р. Уфы (во всех исследуемых масштабах) разделена на отдельные водосборные бассейны в среде ArcGIS (рисунок 4.3).

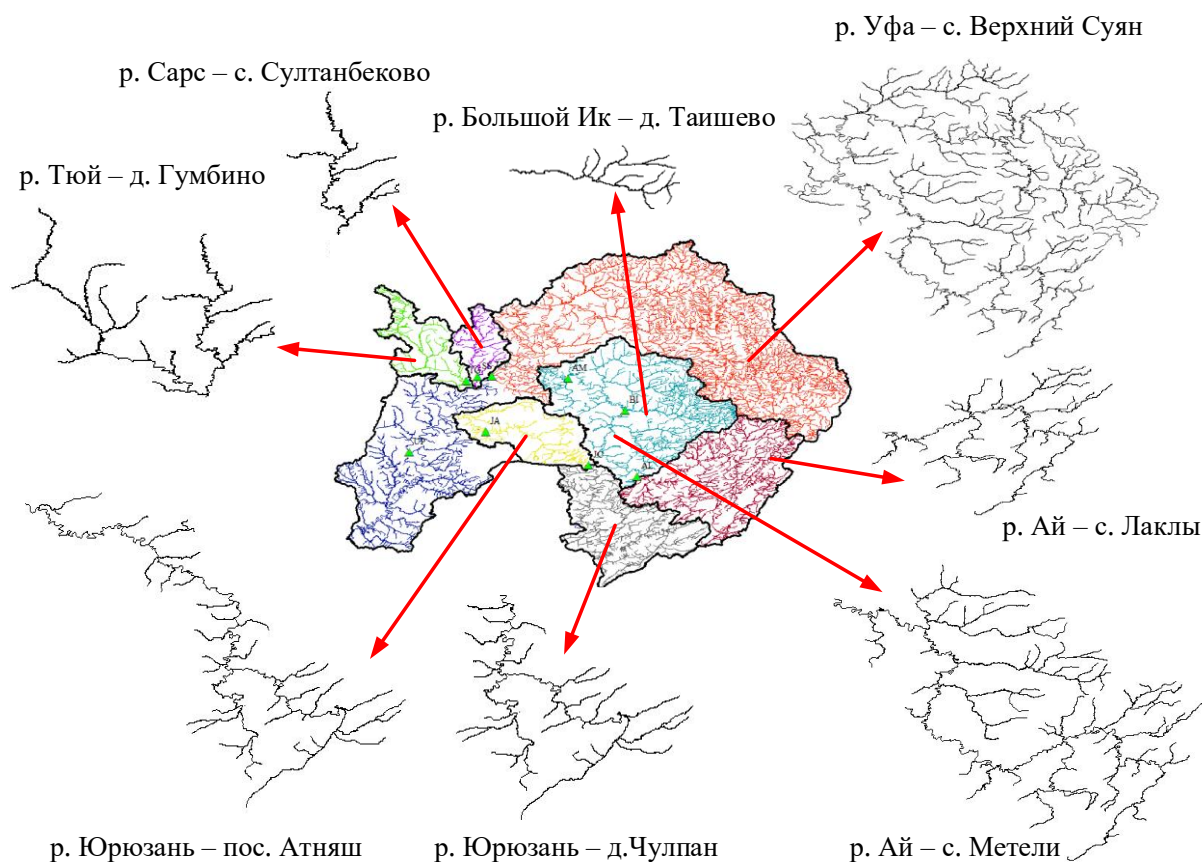


Рисунок 4.3 – Схема разделения бассейна реки Уфа на исследуемые водосборы

Таким образом, выделены границы девять водосборов для водотоков, относящихся к бассейну р. Уфы: р. Ай — с. Лаклы, р. Ай — с. Метели, р. Большой Ик — д. Таишево, р. Сарс — с. Султанбеково, р. Тю — д. Гумбино, р. Уфа — г. Уфа, р. Уфа — с. Верх. Суян, р. Юрюзань — пос. Атяш, р. Юрюзань — д. Чулпан. Размеры полученных изображений водосборов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Размеры изображений водосборов в разных масштабах исследования, (пиксели)

№	Водосбор	Масштаб карты				
		1:2 000 000	1:1 000 000	1: 500 000	1: 200 000	1: 100 000
		Разрешение, dpi				
1	р. Ай – с. Лаклы	354×236	683×480	1408×1668	3572×2420	7126×4764
2	р. Ай – с. Метели	511×394	1020×774	2064×2688	5152×3792	10236×7677
3	Р. Большой Ик – д. Таишево	217×79	440×143	870×494	2158×698	4330×1378
4	р. Сарс – с. Султанбеково	118×157	213×308	438×1042	1076×1564	1653×2323
5	р. Тюй – д. Гумбино	236×177	515×379	1036×1356	2596×1904	3150×2283
6	р. Уфа – г. Уфа	984×630	1998×1278	4016×4646	9944×6408	19882×12992
7	р. Уфа – с. Верх. Суян	708×551	1408×1144	2824×4032	6944×5616	13976×11418
8	р. Юрюзань – пос. Атяш	511×354	1002×688	2024×2448	4976×3240	9882×6969
9	р. Юрюзань – д. Чулпан	295×236	590×447	1240×1600	2900×1984	5905×4724

По данным таблицы 4.1 видно, что все изображения, подготовленные для фрактального анализа, имеют одинаковое разрешение 100 dpi, а их размеры изменяются от 19882×12992 до 217×79 пикселей.

4.2 Сравнительный анализ программных продуктов применяемых, для определения фрактальной размерности

Для отработки методики используемой для определения фрактальной размерности речных сетей выбрано 6 программ, находящихся в открытом доступе: FrakOut, HarFa, Frac, Imagej, Frac_Lac, QGIS. Алгоритмы работы каждой программы подробно описаны в Главе 2. Все рассматриваемые программы в настоящем исследовании реализуют расчетный метод box-counting.

Для сравнения программ выделены основные особенности (настройки), оказывающие влияние на конечный результат расчета фрактальной размерности:

- способ обработки изображения (автоматический/вручную);
- размер минимальной и максимальной ячеек;
- шаг анализа (способ увеличения размера ячейки от минимального до максимального);
- цветовой диапазон изображения;
- производительность ПК;
- разрешение (dpi);
- вид изображения (растр / вектор);
- субъективность полученных результатов;
- взаимное расположение расчетной сетки и исследуемого объекта.

Сравнительный анализ программ, используемых для расчета фрактальной размерности водотоков/речной сети представлен в виде таблицы 4.2. Знаки «+» / «-» обозначает соответственно достоинства и недостатки исследуемых программ.

Таблица 4.2 – Сравнительный анализ программ, для определения фрактальной размерности

Программы, используемые для расчета фрактальной размерности методом box- counting	Автоматическая обработка изображения	Выбор размеров минимальной и максимальной ячеек не зависят от оператора	Выбор шага не зависит от оператора	Результат не зависит от выбранного цветового диапазона изображения	Возможность изменения положения расчетной сетки	Скорость обработки не зависит от производительности ПК	Изображение не требует преобразования в форматы, отличные от .jpg	Возможность работы с векторным изображением	Нет возможности влиять на результат в процессе расчёта
FrakOut!	-	+	+	+	-	+	+	-	+
HarFa	+	-	-	-	-	+	-	-	+
Frac	+	-	-	-	-	-	-	-	-

Imagej	+	-	-	+	-	-	+	-	+
Frac_Lac	+	-	-	+	+	-	+	-	+
QGIS	+	+/-	+/-	+	-	-	-	+	+

Примечание: +/- в зависимости от выбранного режима

Как видно по данным, представленным в таблице 4.2, программы с наименьшим числом недостатков - FrakOut! и QGIS (дополнительный модуль для расчета фрактальной размерности Minkowski dimension calculator). Из 9 оцениваемых параметров на результаты расчета фрактальной размерности в программе FrakOut! влияли: невозможность изменения положения расчетной сетки, наличие погрешности на растровое изображение, а также обработка изображения вручную, которая значительно замедляла процесс расчета.

Количество времени, необходимое на обработку каждого исследуемого водосбора в программе FrakOut!, сведено в таблицу 4.3. Как видно из этой таблицы, с увеличением масштаба исследуемого изображения время анализа увеличивается.

Таблица 4.3 – Время, необходимое для анализа каждого изображения, мин.

	Водосбор	1: 2 000 000	1:1 000 000	1: 500 000	1: 200 000	1: 100 000
1	Ай Лаклы	73	122	162	720	1335
2	Ай Метели	96	121	403	2770	5008
3	Большой Ик	19	30	60	135	776
4	Сарс	23	29	78	165	500
5	Тюй	86	68	142	340	890
6	Уфа	123	607	2949	16740	23456
7	Уфа Верх. Суян	108	471	751	9600	12418
8	Юрюзань Атняш	48	63	291	970	5040
9	Юрюзань Чулпан	30	81	166	732	2760
	Суммарно по масштабу	606	1592	5002	32172	52183
	Итого:					91555 мин.

Время расчета фрактальной размерности, в остальных программах не учитывалось, так как происходило в режиме реального времени. При сканировании изображения результаты выводились на экране практически сразу, за исключением крупных масштабов, обработка которых занимала несколько

минут и зависела от производительности компьютера. Например, анализ самого большого изображения Уфа 1: 100 000 (21,6 Мб) в программе Frac_Lac при работе на компьютере с процессором AMD A4-6300 3,7 ГГц и 16 Гб оперативной памяти составило около 50 минут, при чем операция расчета занимала 70-100% всей памяти.

Отличительной чертой программы QGIS являлась работа с изображением в векторном формате, что с одной стороны избавляло от погрешности растровых изображений, но с другой требовало векторизации анализируемых изображений. Результаты расчета QGIS зависели от производительности компьютера и от положения расчетной сетки. Выбор размера минимальной и максимальной ячеек, а также шаг ряда, мог задаваться в зависимости от выбранного режима построения расчётных сеток.

Imagej и Frac_Lac - сходные по своим характеристикам программы, однако анализ изображение в Imagej предполагал изменение положения расчетной сетки при определении фрактальной размерности. Самой «зарегулированной» из всех анализируемых программ стала Frac. Единственное достоинство программы заключалось в возможности автоматической обработки изображения.

Анализируя таблицу 4.2 можно сделать вывод, что к наиболее распространённым недостаткам программ относятся:

- субъективный фактор (выбор шага, размеров минимальной и максимальной ячеек не зависят от оператора);
- ограничения производительности ПК;
- функциональные ограничения программ и анализируемых изображений.

4.3 Описание работы программы «Автоматизированный расчет фрактальной размерности» (АРФР)

Для устранения недостатков, имеющих в существующих программах авторами разработана программа «Автоматизированный расчет фрактальной размерности» (АРФР) (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618323 от 25.06.2014). В АРФР простота расчёта сочетается с минимальной возможностью оператора влиять на конечный результат.

АРФР представляет собой программный модуль для MatLab и реализует алгоритм box-counting в обратном порядке, двигаясь от наименьшей ячейки разделения к наибольшей (рисунок 4.4).

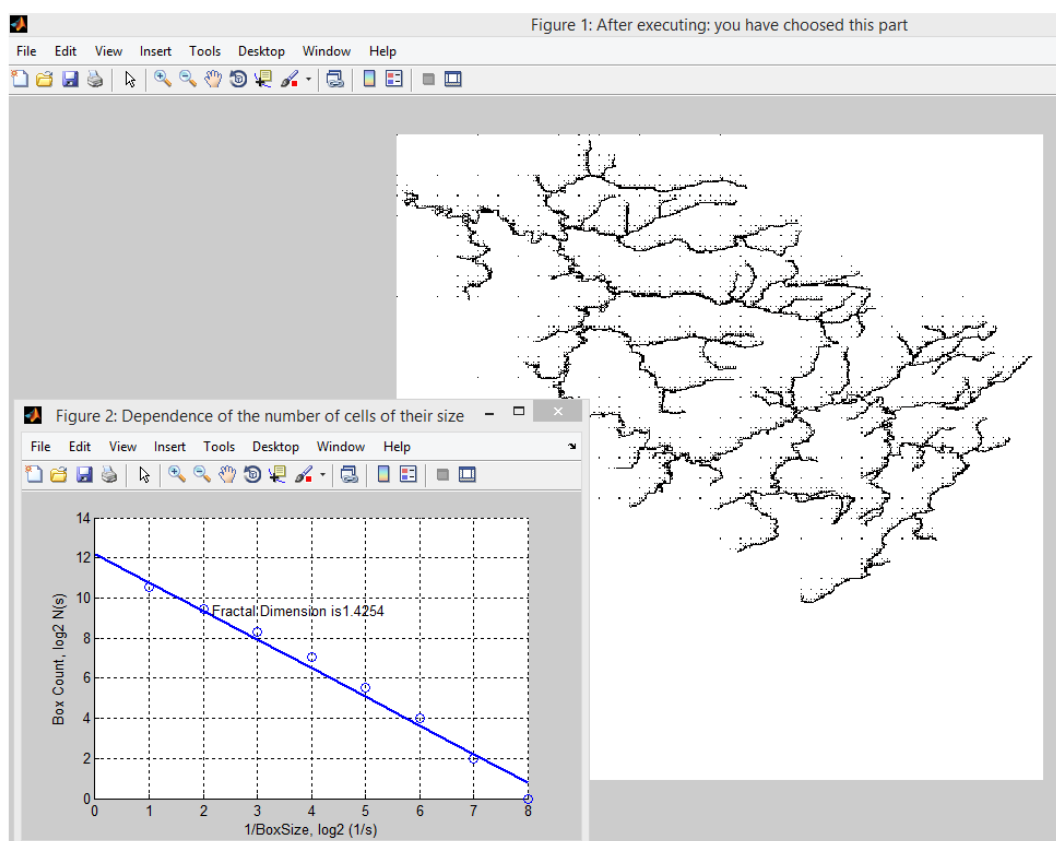
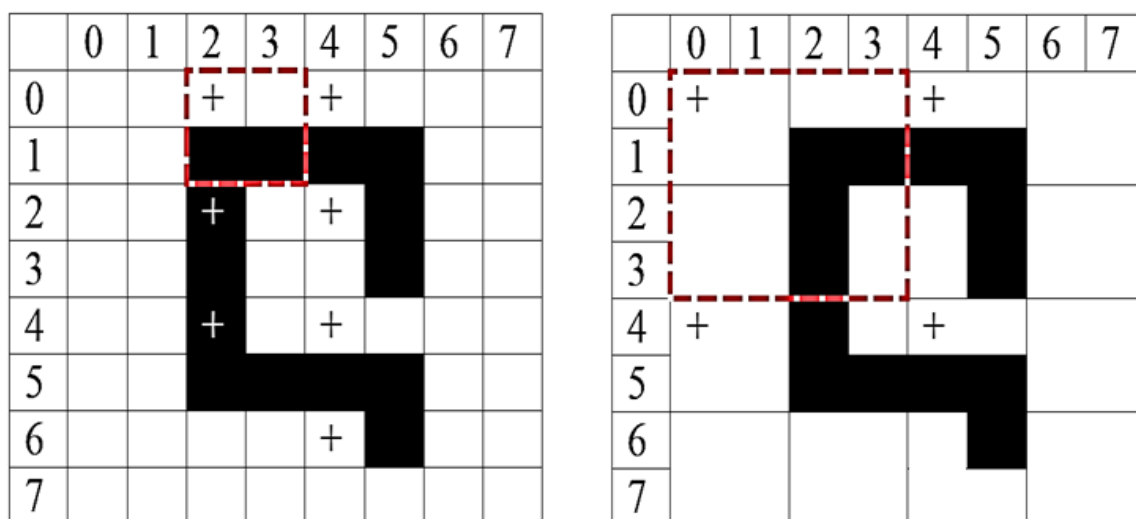


Рисунок 4.4 – Диалоговое окно программы АРФР

При работе в АРФР изначально изображение разбивалось на наименьшие квадраты размером 1×1 pix (наименьший элемент изображения). Далее

программа запоминала закрашенные ячейки и делала отметку в левом верхнем углу, где на следующей итерации, при укрупнении ячейки расчетной сетки, будет находится угол уже большей ячейки. Таким образом в самом начале, в будущей ячейке, делалась отметка о наличии в ней изображения. На следующем укрупненном уровне снова делалась запись в левом верхнем углу будущей большей ячейке, чтобы показать наличие изображения на данном участке. На каждом последующем уровне размер ячейки увеличивается в 4 раза. На рисунке 4.5 черными квадратами обозначены точки, содержащие изображение, знаком плюс — сигнальные точки в левом верхнем углу будущей ячейки, красная пунктирная линия указывает границы будущей ячейки.



■ - точки изображения

⊕ - сигнальные точки в левом верхнем углу будущей ячейки

--- - границы будущей ячейки

Рисунок 4.5 –Алгоритм работы АРФР

Основными отличиями АРФР от аналогов является ускоренная автоматическая обработка изображения, благодаря его предварительному индексированию, что значительно снижает трудоемкость расчета.

Программа проставляла дополнительные метки в узлах разбиения, чтобы дважды не проходить по одному и тому же участку:

— шаг анализа и величина максимальной ячейки задавались автоматически

и не зависели от выбора оператора (минимизация субъективного фактора);

— количество итераций (шаг анализа) и величина максимальной ячейки за-

давались автоматически и не зависели от выбора оператора (ликвидируется субъективный фактор).

Так как АРФР является плагином, то для его работы персональный компьютер должен соответствовать следующим системным требованиям для MATLAB R2020b [196].

Таблица 4.4 - Характеристики программы АРФР

Программы, используемые для расчета фрактальной размерности методом box-counting	Автоматическая обработка изображения	Выбор размеров минимальной и максимальной ячеек не зависят от оператора	Выбор шага не зависит от оператора	Результат не зависит от выбранного цветового диапазона изображения	Возможность изменения положения расчетной сетки	Скорость обработки не зависит от производительности ПК	Изображение не требует преобразования в форматы, отличные от jpg	Возможность работы с векторным изображением	Нет возможности влиять на результат в процессе расчёта
АРФР	+	+	+	+	-	-	+	-	+

Согласно данным, представленным в таблице 4.4, в АРФР учтено большинство факторов, потенциально вызывающих погрешности в результатах фрактального анализа. Однако особенность расчетного алгоритма АРФР не позволяет изменять положение расчетной сетки, скорость расчета зависит от производительности ПК. Программа работает только с растровыми изображениями, вследствие чего результаты расчета фрактальной размерности зависят от погрешностей генерализации карт. Эти результаты, полученные в АРФР, представлены на рисунке 4.6. Величины фрактальной размерности водосборов изменялись в диапазоне от 1,18 до 1,49.

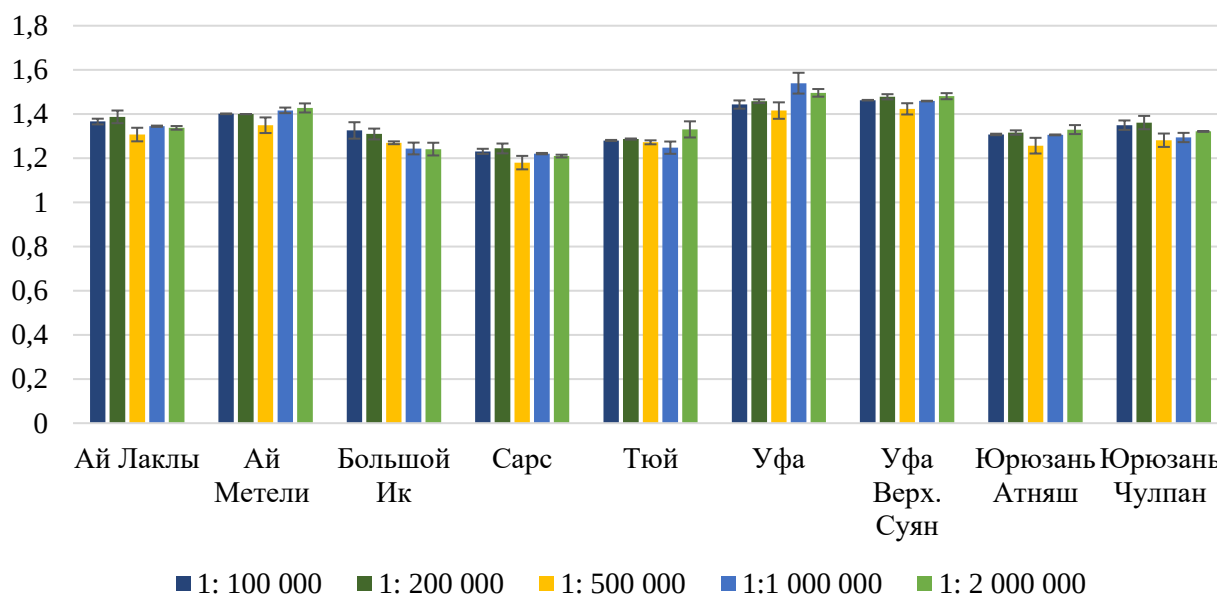


Рисунок 4.6 - Результаты расчета фрактальной размерности для исследуемых водосборов, полученные в программе АРФР

Как видно из графика наибольшие значения фрактальной размерности характерны для наибольших по площади водосборных территорий, что, по-видимому, связано с их более развитой гидрографической сетью. Самые высокие значения фрактальной размерности принадлежали двум наиболее крупным водосборам: р. Уфа –Павловская ГЭС (47100 км²) и р. Уфа- с. Верхний Суян (32400 км²), наименьшие – р. Сарс – с. Султанбеково (1300 км²) и р. Тюй – д. Гумбино (2180 км²).

Как видно по графикам на рисунке 4.6 для большинства водосборов масштаб практически не влиял на величину фрактальной размерности (диапазон вариации не превышал относительное значение погрешности). Исключение составил бассейн р. Большой Ик, где с увеличением масштаба происходило увеличение фрактальной размерности с 1,39 до 1,46. А также бассейн р. Тюй, наибольшее значение 1,33 отмечалось при самом меньшем масштабе 1:2 000 000.

Одной из особенностей результатов расчета фрактальной размерности гидрографической сети явилось то, что значения фрактальной размерности в масштабе 1: 500000 получились ниже, по сравнению с величинами, выявленными

при других масштабах исследования. Это, вероятнее всего, связано с разницей в качестве анализируемых изображений.

4.4 Результаты расчета фрактальной размерности рек водосборного бассейна р. Уфа

Расчет фрактальной размерности выполнен с помощью программ: FrakOut, HarFa, Frac, Imagej, Frac_Lac, QGIS, АРФР. В рамках настоящего исследования получено 675 значений фрактальных размерностей (9 водосборов в 5 масштабах, 7 программ (15 различных режимов)), результаты сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты расчета фрактальных размерностей исследуемых водосборов бассейна р. Уфа

Водосбор		Frak Out	HarFa b+w	HarFa b+bw	HarFa w+bw	Frac	Imagej 2_0	Imagej 2_1	Frac_ Lac Def	Frac_ Lac Power	Frac_ Lac_ Scaled 1_2	Frac_ Lac_ Scaled 1_3	Frac_ Lac_ Scaled 1_4	Frac_ Lac_ Relative	QGIS	APФР
р. Ай - с. Лаклы	1: 2 000000	1,45	1,34	1,31	2,00	1,23	1,34	1,38	1,33	1,30	1,29	1,31	1,28	1,28	1,47	1,34
	1:1 000000	1,47	1,36	1,32	2,00	1,17	1,34	1,38	1,35	1,31	1,30	1,35	1,35	1,31	1,48	1,34
	1: 500000	1,46	1,32	1,30	2,00	1,18	1,31	1,36	1,34	1,29	1,31	1,32	1,31	1,28	1,50	1,31
	1: 200000	1,50	1,41	1,37	2,00	1,28	1,38	1,42	1,37	1,35	1,39	1,38	1,42	1,34	1,52	1,39
	1: 100000	1,48	1,38	1,34	2,00	1,30	1,36	1,41	1,36	1,35	1,38	1,33	1,37	1,36	1,55	1,37
р. Ай – с. Метели	1: 2 000000	1,52	1,40	1,36	2,00	1,31	1,41	1,46	1,35	1,33	1,36	1,36	1,34	1,32	1,51	1,43
	1:1 000000	1,52	1,40	1,36	2,00	1,26	1,40	1,46	1,37	1,34	1,38	1,32	1,41	1,35	1,51	1,42
	1: 500000	1,45	1,35	1,34	2,00	1,26	1,35	1,40	1,37	1,32	1,32	1,31	1,37	1,33	1,57	1,35
	1: 200000	1,51	1,43	1,39	2,00	1,29	1,40	1,45	1,40	1,39	1,39	1,41	1,37	1,40	1,59	1,40
	1: 100000	1,50	1,42	1,38	2,00	1,32	1,40	1,44	1,39	1,38	1,37	1,41	1,40	1,38	1,56	1,40
р. Большой Ик – д. Таишево	1: 2 000000	1,39	1,24	1,20	1,99	1,16	1,23	1,26	1,16	1,21	1,20	1,22	1,19	1,16	1,22	1,24
	1:1 000000	1,35	1,18	1,15	2,00	1,06	1,24	1,28	1,20	1,19	1,20	1,18	1,16	1,19	1,26	1,24
	1: 500000	1,39	1,22	1,19	2,00	1,05	1,28	1,33	1,29	1,20	1,24	1,20	1,26	1,21	1,30	1,27
	1: 200000	1,41	1,33	1,28	2,00	1,16	1,29	1,33	1,30	1,33	1,29	1,35	1,31	1,27	1,39	1,31
	1: 100000	1,46	1,34	1,30	2,00	1,24	1,32	1,35	1,30	1,30	1,31	1,35	1,29	1,33	1,38	1,33
р. Сарс – с. Султанбеко во	1: 2 000000	1,34	1,22	1,21	2,00	1,18	1,20	1,21	1,18	1,18	1,18	1,17	1,18	1,19	1,30	1,21
	1:1 000 000	1,32	1,23	1,21	2,00	1,07	1,22	1,25	1,21	1,17	1,20	1,20	1,20	1,20	1,36	1,22
	1: 500000	1,35	1,24	1,27	2,00	1,05	1,19	1,21	1,21	1,15	1,18	1,17	1,15	1,19	1,42	1,18
	1: 200000	1,37	1,25	1,22	2,00	1,14	1,26	1,30	1,29	1,22	1,26	1,25	1,24	1,21	1,47	1,24
	1: 100000	1,34	1,25	1,22	2,00	1,16	1,24	1,28	1,28	1,22	1,22	1,21	1,25	1,22	1,47	1,23
р. Тюй – д. Гумбино	1: 2 000000	1,44	1,27	1,25	2,00	1,19	1,30	1,34	1,27	1,23	1,24	1,27	1,28	1,23	1,41	1,33
	1:1 000000	1,39	1,25	1,23	2,00	1,14	1,32	1,36	1,29	1,23	1,23	1,27	1,25	1,24	1,43	1,25
	1: 500000	1,38	1,26	1,26	2,00	1,15	1,28	1,32	1,30	1,24	1,23	1,25	1,23	1,24	1,47	1,27
	1: 200000	1,39	1,28	1,25	2,00	1,14	1,30	1,33	1,33	1,26	1,27	1,25	1,31	1,26	1,51	1,29
	1: 100000	1,39	1,28	1,25	2,00	1,22	1,28	1,32	1,32	1,25	1,29	1,25	1,31	1,27	1,50	1,28

Водосбор		Frak Out	HarFa b+w	HarFa b+bw	HarFa w+bw	Frac	Imagej 2_0	Imagej 2_1	Frac_ Lac Def	Frac_ Lac Power	Frac_ Lac_ Scaled 1_2	Frac_ Lac_ Scaled 1_3	Frac_ Lac_ Scaled 1_4	Frac_ Lac_ Relative	QGIS	APФР
р. Уфа – Павловская ГЭС	1: 2 000000	1,60	1,51	1,47	2,00	1,40	1,48	1,53	1,45	1,43	1,45	1,41	1,49	1,40	1,59	1,50
	1:1 000000	1,59	1,47	1,45	2,00	1,37	1,52	1,55	1,48	1,47	1,48	1,50	1,48	1,48	1,61	1,54
	1: 500000	1,68	1,46	1,43	2,00	1,37	1,40	1,46	1,43	1,39	1,38	1,43	1,38	1,39	1,59	1,42
	1: 200000	1,55	1,49	1,45	2,00	1,39	1,45	1,50	1,43	1,43	1,43	1,47	1,46	1,43	1,62	1,46
	1: 100000	1,61	1,49	1,48	2,00	1,38	1,43	1,48	1,43	1,43	1,42	1,41	1,41	1,43	1,60	1,44
р. Уфа – с. В. Суян	1: 2 000000	1,60	1,52	1,47	2,00	1,40	1,44	1,49	1,43	1,42	1,42	1,47	1,47	1,42	1,58	1,48
	1:1 000000	1,57	1,46	1,45	2,00	1,39	1,43	1,48	1,43	1,41	1,41	1,43	1,39	1,42	1,58	1,46
	1: 500000	1,60	1,43	1,40	2,00	1,30	1,42	1,47	1,41	1,37	1,42	1,42	1,45	1,41	1,58	1,42
	1: 200000	1,61	1,51	1,47	2,00	1,42	1,47	1,53	1,44	1,45	1,48	1,43	1,46	1,46	1,59	1,48
	1: 100000	1,58	1,47	1,45	2,00	1,38	1,46	1,51	1,43	1,43	1,47	1,48	1,49	1,45	1,59	1,46
р. Юрюзань - пос.Атняш	1: 2 000000	1,39	1,35	1,31	2,00	1,24	1,30	1,33	1,22	1,25	1,27	1,28	1,25	1,24	1,34	1,33
	1:1 000000	1,37	1,32	1,29	2,00	1,17	1,28	1,32	1,23	1,25	1,27	1,23	1,27	1,24	1,37	1,31
	1: 500000	1,35	1,29	1,26	2,00	1,17	1,26	1,29	1,20	1,24	1,23	1,24	1,26	1,25	1,38	1,26
	1: 200 000	1,39	1,35	1,32	2,00	1,23	1,32	1,35	1,28	1,30	1,29	1,33	1,28	1,29	1,42	1,32
	1: 100000	1,39	1,33	1,30	2,00	1,26	1,31	1,34	1,27	1,29	1,28	1,31	1,31	1,32	1,42	1,31
р. Юрюзань - д. Чулпан	1: 2 000000	1,47	1,37	1,32	2,00	1,23	1,30	1,34	1,33	1,28	1,28	1,27	1,26	1,29	1,46	1,32
	1:1 000000	1,43	1,31	1,28	2,00	1,15	1,28	1,32	1,33	1,25	1,26	1,30	1,29	1,27	1,49	1,29
	1: 500000	1,36	1,28	1,25	2,00	1,17	1,27	1,32	1,31	1,26	1,28	1,27	1,27	1,26	1,52	1,28
	1: 200000	1,43	1,37	1,33	2,00	1,21	1,36	1,37	1,38	1,33	1,33	1,31	1,37	1,32	1,52	1,36
	1: 100000	1,46	1,34	1,31	2,00	1,26	1,32	1,36	1,36	1,29	1,31	1,35	1,30	1,30	1,58	1,35

В качестве примера на рисунке 4.7 представлена графическая интерпретация результатов расчета фрактальной размерности водосборов р. Уфа в пяти исследуемых масштабах с помощью программы FrakOut!. Как видно из графиков значения фрактальной размерности варьировались в пределах от 1,32 (Сарс 1: 1 000 000) до 1,68 (Уфа 1: 500 000).

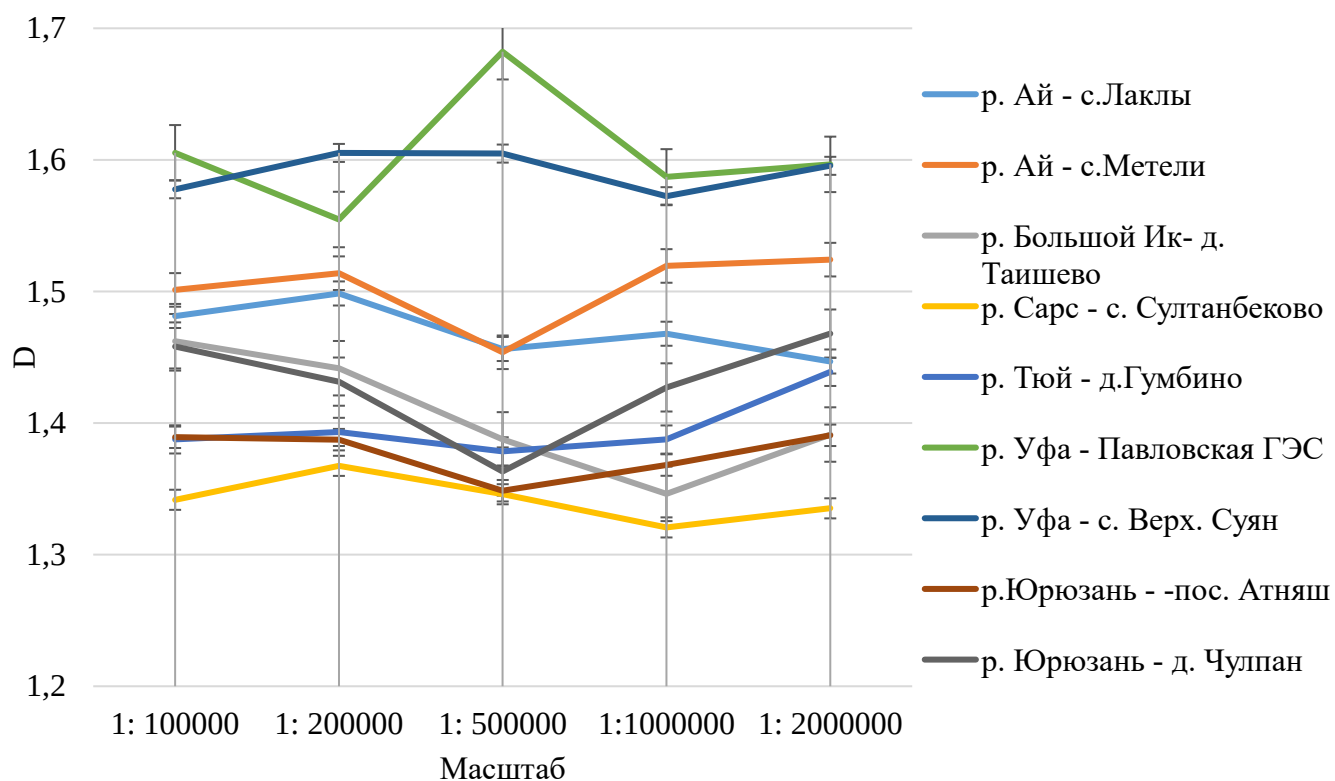


Рисунок 4.7 – Результаты расчета фрактальной размерности для исследуемых водосборов, полученные в программе FrakOut! (доверительный интервал – относительная погрешность)

Наименьшие значения фрактальной размерности характерны для водосборов р. Сарс, р. Тюй и р. Юрюзань – пос. Атнаш значения фрактальной размерности в большинстве не превышали 1,4, тогда как значения для водосборов на р. Уфа достигали 1,6). В бассейне р. Ай самые большие значения отмечались для водосбора с устьем в с. Метели. Изменение масштаба оказывало небольшое влияние на значения фрактальной размерности водосборов р. Ай – с. Лаклы, р. Сарс, р. Тюй, р. Уфа - с. Верхний Суян, р. Юрюзань- пос. Атнаш. Для

водосборных бассейнов р. Ай – с. Метели, р. Уфа – Павловская ГЭС, и р. Юрюзань – д. Чулпан отмечались отклонения значений фрактальной размерности в масштабе 1: 500 000 по сравнению с остальными четырьмя масштабами.

Показатели фрактальных размерностей гидрографической сети р. Уфа численно соотносились с данными полученными другими авторами при расчете разветвлённых геологических структур [51, 52, 57, 58, 68, 71, 197-199]. Сидорчук А.Ю. показал, что для Северной Евразии фрактальная размерность речных сетей изменяется в диапазоне 1,1 – 1,7 [53]. Согласно работе Чупиковой С.А. речные бассейны Саяно-Тувинского нагорья характеризуются значениями 1,1-1,5 [51].

Если математический (классический) фрактал — это множество, обладающее свойством бесконечного самоподобия или масштабной инвариантности, то на практике разрешение цифровых (растровых) изображений в конечном итоге ограничиваются размером самой маленькой ячейки – 1 пиксель, поэтому определяя фрактальную размерность растрового изображения классического фрактала практически невозможно достигнуть значения фрактальной размерности, полученной аналитическим методом. Анализируя изображения можно лишь бесконечно приближаться к теоретическим значениям. Минимизировать погрешности, связанные с разрешением, возможно путем создания программы обрабатывающей изображения высоких разрешений.

Теоретически фрактальная размерность речной сети, как природного объекта, обладающего фрактальными свойствами, должна оставаться неизменной, несмотря на изменения масштаба исследования. На практике, в условиях ограничений разрешения изображения, ожидаемо, что фрактальная размерность может увеличиваться при укрупнении масштаба исследования, в связи с ростом извилистости и разветвленности речной сети.

Для всех программ, работающих с растровыми изображениями, характерно увеличение фрактальной размерности с уменьшением масштаба, что, по-видимому, связано с увеличением доли темных пикселей в изображениях

меньшего размера. Программы, сканируя изображения, распознают темные пиксели и выдают завышенные значения фрактальной размерности, что никак не связано с усложнением рисунка речной сети.

На рисунке 4.8 представлена доля (%) темных пикселей для каждого исследуемого водосбора в пяти масштабах.

Как видно на рисунке 4.8, наибольшая доля темных пикселей по отношению к общему размеру изображения характерна для малых масштабов (1:1000000 и 1:2000000), тогда как для масштаба 1:100000 она не превышает 1%. Таким образом, результаты расчета фрактальной размерности изображений зависели от количества темных (цветных) пикселей на анализируемых водосборах.

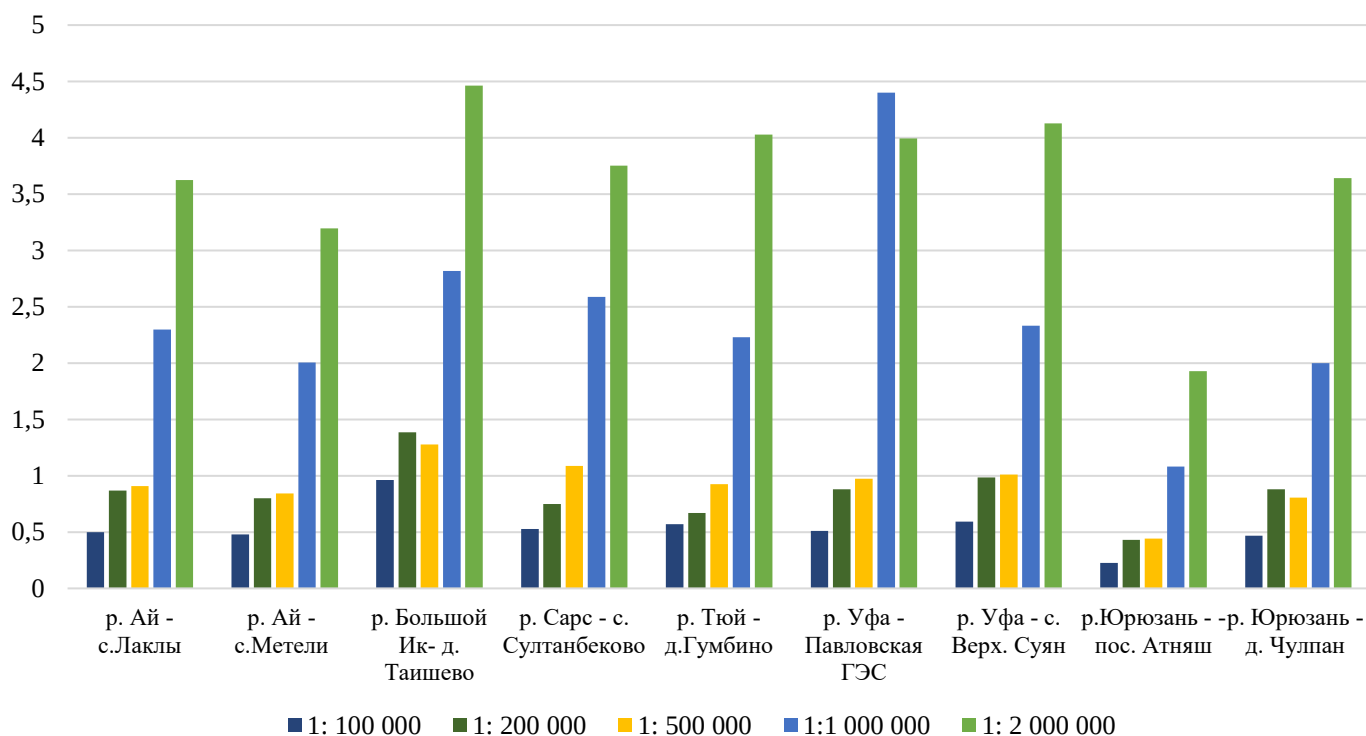


Рисунок 4.8 – Доля (%) темных пикселей в анализируемых водосборах в разных масштабах исследования

Величина фрактальной размерности зависит от шага анализа, от количества ячеек, содержащих изображение на каждом шаге анализа, от величины максимальной и минимальной ячейки. Поэтому, невозможно

проводить сравнительный анализ между фрактальными размерностями природных объектов, рассчитанных в разных программах с использованием разных алгоритмов и настроек.

Выбор программы расчета фрактальной размерности основывается на задачах исследования. Если задача состоит в ознакомлении с методом box-counting, то лучше всего подходит программа FrakOut!, если необходим анализ зависимости фрактальной размерности от вида задаваемого ряда – то программа Frac_Las, для анализа векторного изображения - лучшая программа QGIS (Minkowski dimension calculator).

Оптимальным вариантом расчета фрактальной размерности с быстрым анализом большого количества изображений и минимальным влиянием оператора на производимый расчет стало применение разработанной авторами программы АРФР, как максимально простой (с точки зрения пользователя) программы, устанавливаемой на готовое ПО и обеспечивающей значительное снижение трудоемкости расчётов.

4.5 Обоснование выбора программы и масштаба исследования для определения фрактальной размерности

Обоснование выбора программы и масштаба исследования выполнялись на основе статистической обработки данных в два этапа:

- 1) осуществлялись поиск и исключение грубых погрешностей среди всей выборки значений фрактальной размерности на основе критерия Романовского;
- 2) программа выбиралась с помощью кривых обеспеченности.

4.5.1 Выбор программы для расчета фрактальной размерности на основании критерия Романовского

Наличие грубой погрешности среди общей совокупности ряда значений фрактальной размерности искажает результат сравнительного анализа программ. Но необдуманное отбрасывание резко отличающихся от других результатов измерений может, привести к существенному искажению характеристик измерений. Поэтому, при первоначальной обработке экспериментальных данных рекомендовано проверять любую совокупность измерений на наличие грубых промахов с помощью статистических критериев [200].

Проверяемая гипотеза состояла в утверждении, что результат наблюдения x_i не является грубой погрешностью, т. е. является одним из возможных значений измеряемой величины X . Проверялись наибольшее и наименьшее значения результатов измерений. Для проверки гипотезы задавалась доверительная вероятность q (уровень значимости) того, что сомнительный результат действительно мог иметь место в данной совокупности результатов измерений [201]. Вероятность $q = 0,05$ ($P = 95 \%$) соответствовала критерию Романовского, равному 2,64. При оценке погрешности каждое значение фрактальной размерности по очереди ставилось под сомнение. Далее, при последовательном исключении сомнительных значений, рассчитывались средние арифметические значения и статистические средние квадратические отклонения (СКО).

При проверке всех масштабов исследования (1:100000, 1:200000, 1:500000, 1:1000000, 1:2000000) установлено, что значения $\text{HarFa } w+bw$ всегда являлись грубой погрешностью, поэтому они исключены из массива данных, средние арифметические значения и СКО определены без них. Средние значения фрактальной размерности и диапазоны погрешностей представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Средние значения фрактальной размерности для исследуемых водосборов с погрешностями

Масштаб	1:100000	1:200000	1:500000	1:1000000	1:2000000
р. Ай – с.Лаклы	1,38±0,036	1,39±0,035	1,33±0,044	1,35±0,041	1,33±0,038
р. Ай – с. Метели	1,41±0,034	1,42±0,040	1,36±0,043	1,39±0,039	1,39±0,039
р. Большой Ик –д. Таишево	1,33±0,029	1,31±0,034	1,25±0,046	1,21±0,037	1,22±0,033
р. Сарс – с.Султанбеково	1,26±0,042	1,26±0,045	1,21±0,051	1,22±0,037	1,21±0,028
р. Тюй – д. Гумбино	1,30±0,040	1,30±0,048	1,28±0,044	1,28±0,041	1,29±0,041
р. Уфа – Павловская ГЭС	1,46±0,039	1,47±0,034	1,44±0,051	1,50±0,033	1,48±0,036
р. Уфа – с. В.Суян	1,48±0,032	1,49±0,032	1,44±0,045	1,45±0,033	1,47±0,034
р. Юрюзань – пос. Атнаш	1,32±0,025	1,32±0,028	1,26±0,031	1,28±0,031	1,29±0,029
р. Юрюзань – д. Чулпан	1,35±0,047	1,36±0,040	1,29±0,045	1,30±0,044	1,32±0,041

Как видно из таблицы 4.6 значения погрешностей варьировались в диапазоне от 0,025 до 0,051. Наибольшие погрешности в результатах расчета фрактальной размерности характерны для водосборов в масштабе 1: 500 000, что говорит об особенностях анализируемого изображения в данном масштабе. Наиболее близки между собой средние значения фрактальной размерности исследуемых водосборов в масштабах 1: 100 000 – 1: 200 000 и 1: 1 000 000 – 1: 2 000 000 соответственно.

4.5.2 Определение наиболее достоверных результатов расчета фрактальной размерности с помощью кривых обеспеченности

Кривые обеспеченности – метод статистического анализа наиболее часто используемые для гидрологических расчётов. Понятие «обеспеченность» в гидрологии равнозначно понятию «вероятность превышения» в математической статистике [202]. Обеспеченность показывает вероятность превышения отдельных значений над всеми значениями выборки анализируемых данных. Ранее, с помощью критерия Романовского, удалось установить, что значения

программы HarFa в режиме w+bw можно отбросить, так как полученные результаты существенно превышали ожидаемые значения. Таким образом кривые обеспеченности для каждого водосбора строились по результатам расчетов, полученных 14 способами измерения фрактальной размерности (программа HarFa предполагала 2 способа определения фрактальной размерности, Imagej – 2 способа, Frac_Las – 6 способов).

Построение кривых обеспеченности значений фрактальной размерности происходило следующим образом. Имеющийся ряд значений фрактальных размерностей для каждого водосбора располагался в убывающем порядке. На графике по оси ординат откладывались значения убывающего ряда, а по оси абсцисс – значения обеспеченности, которые рассчитывались по формуле 4.1:

$$p = \frac{m}{n + 1} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

где p – вероятность превышения величины фрактальной размерности;

m – порядковый номер величины фрактальной размерности в ранжированном по убыванию ряду;

n – общее количество членов ряда (период наблюдений).

Построение кривых обеспеченности проводилось с помощью компьютерной программы «StokStat 1.2.0 – Статистика для гидрологии». В целях настоящего исследования построено и проанализировано 1260 кривых обеспеченности.

В данном исследовании отобраны значения фрактальных размерностей, принадлежащие диапазону 25-75% обеспеченности, как наиболее вероятному. Пример построения кривой обеспеченности для р. Ай – с. Лаклы в масштабе 1:2 000 000 представлен на рисунке 4.9.

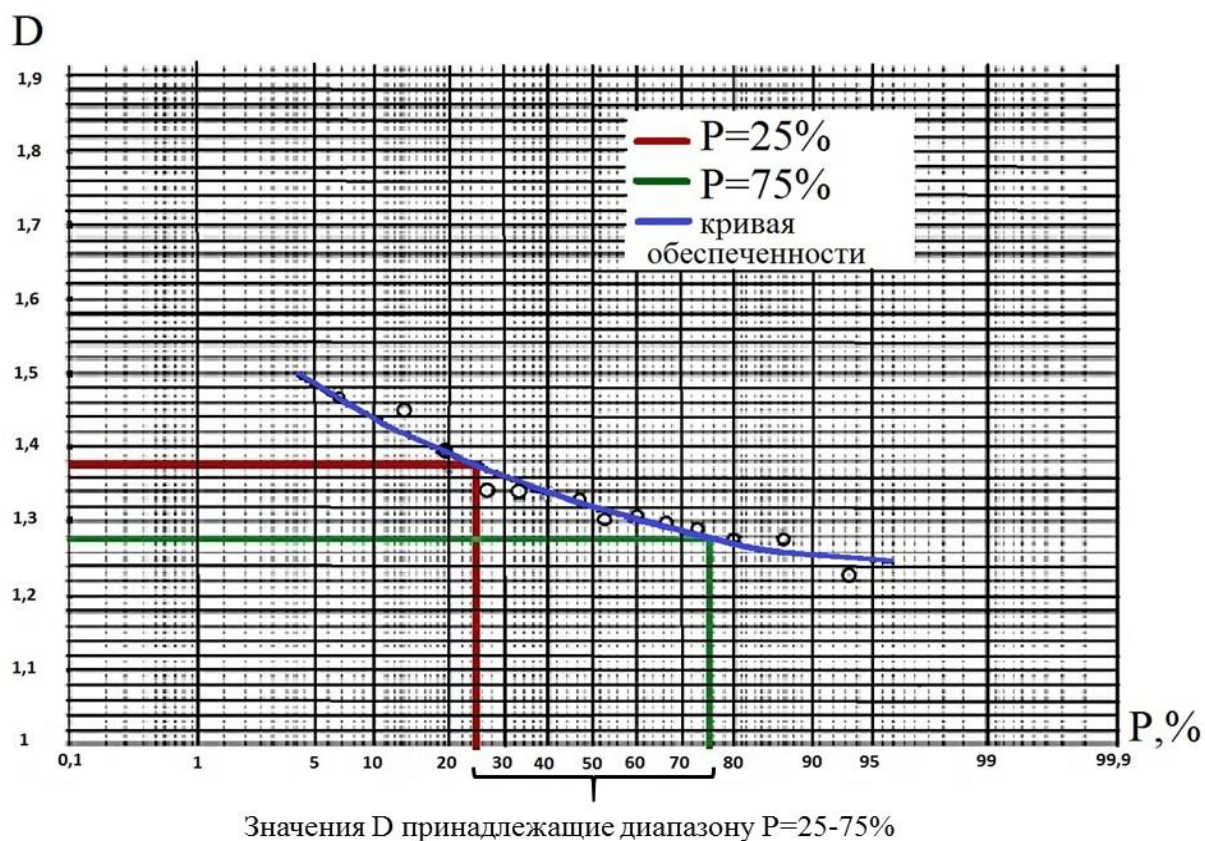


Рисунок 4.9 – Пример кривой обеспеченности значений фрактальной размерности D для водосбора р. Ай – с. Лаклы в масштабе 1:2 000 000

По данным кривых обеспеченности определены диапазоны значений фрактальных размерностей для каждого водосбора во всех 5 масштабах исследования. Нижняя граница диапазона соответствует P соответствует 75%, верхняя – 25%. Результаты графического анализа кривых обеспеченности представлены в таблице 4.7 и интерпретированы на рисунке 4.10.

Таблица 4.7 – Значения фрактальных размерностей исследуемых водосборов входящие в диапазон обеспеченности 25-75%

Створ	1:100000		1:200000		1:500000		1:1000000		1:2000000	
	75%	25%	75%	25%	75%	25%	75%	25%	75%	25%
р. Ай — с. Лаклы	1,33	1,42	1,34	1,44	1,26	1,38	1,29	1,40	1,28	1,37
р. Ай — с. Метели	1,36	1,45	1,36	1,46	1,30	1,41	1,34	1,45	1,33	1,44
р. Большой Ик — д. Таишево	1,29	1,36	1,27	1,36	1,19	1,31	1,17	1,26	1,18	1,26
р. Сарс — с. Султанбеково	1,20	1,29	1,20	1,31	1,14	1,27	1,17	1,27	1,17	1,24
р. Тюй — д. Гумбино	1,25	1,34	1,23	1,35	1,22	1,33	1,22	1,33	1,23	1,34
р. Уфа — г. Уфа	1,41	1,50	1,42	1,50	1,37	1,49	1,45	1,54	1,43	1,52
р. Уфа — с.В. Суян	1,41	1,51	1,44	1,52	1,38	1,49	1,40	1,49	1,42	1,51

Створ	1:100000		1:200000		1:500000		1:1000000		1:2000000	
	75%	25%	75%	25%	75%	25%	75%	25%	75%	25%
р. Юрюзань — пос. Атнаш	1,28	1,35	1,28	1,35	1,22	1,30	1,24	1,32	1,25	1,33
р. Юрюзань — д. Чулпан	1,28	1,39	1,24	1,41	1,24	1,34	1,24	1,36	1,27	1,37

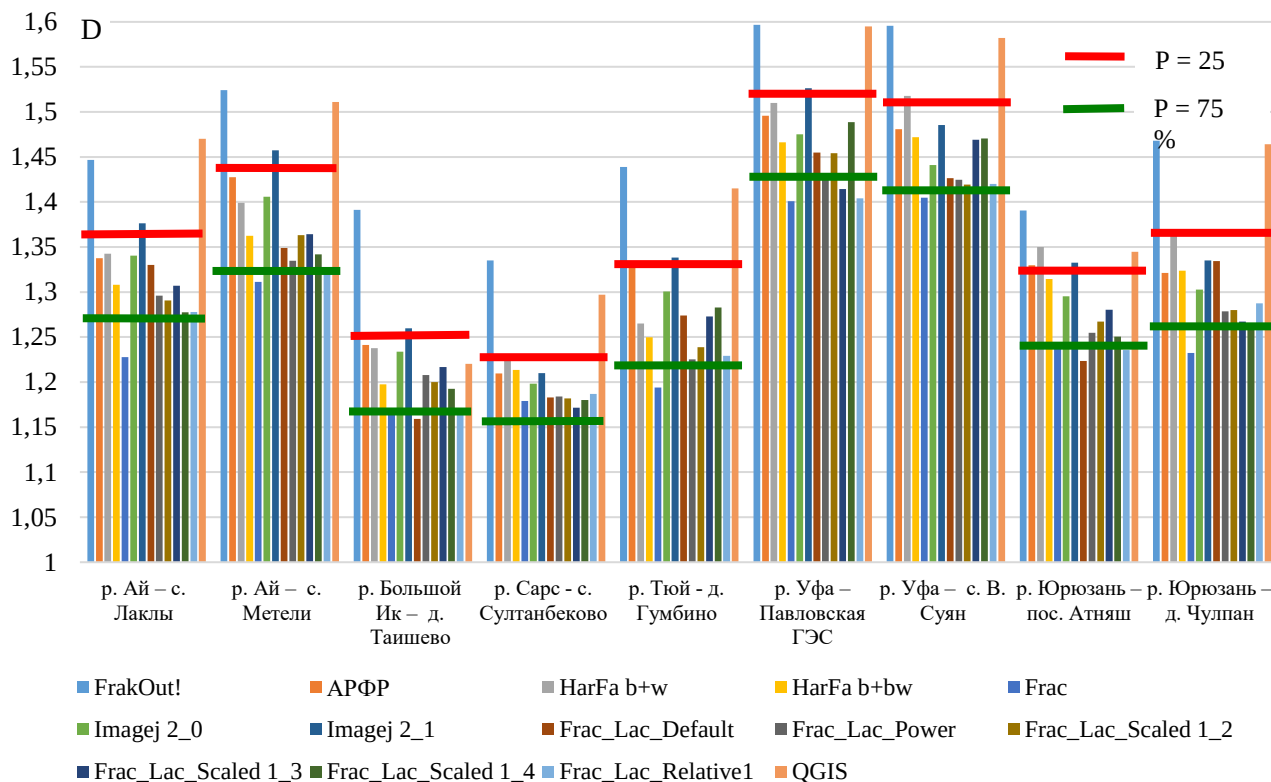


Рисунок 4.10 – Результаты расчёта фрактальной размерности в масштабе

1: 2 000 000 с отметкой данных 25 – 75 % обеспеченности

По результатам анализа исключены значения, полученные в 3 программах: FrakOut!, Frac, QGIS, как не вошедшие в диапазон 25 – 75% обеспеченности.

Сравнив между собой характеристики изучаемых программ (HarFa, Imagej, Frac_Lac, APФР) по критериям, приведенным в таблицах 4.2 и 4.4 видно, что наибольшему количеству критериев соответствует программа APФР.

4.5.3 Исследование масштабной инвариантности фрактальной размерности рек водосборного бассейна р. Уфа

В ряде исследований [51, 203] показано, что для достоверного определения фрактальной размерности водных объектов необходимо выбирать изображение

максимально возможного масштаба. Однако конкретные значения масштабов и степень детализации изображений не уточняются, что обуславливает актуальность обоснования выбора масштаба объектов исследования. Минимальный достаточный масштаб исследования с двух сторон ограничен противоположными условиями:

- масштаб изображения должен быть достаточно крупным и устойчивым к генерализации;

- масштаб изображения должен быть лишенным избыточной подробности элементов речной сети, затрудняющих вычисления.

Обоснование выбора масштаба исследуемых водосборов осуществлялся следующим образом. Для оставшихся значений фрактальных размерностей построены кривые 50% обеспеченности. Значения фрактальных размерностей исследуемых водосборов 50% обеспеченности представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения фрактальных размерностей исследуемых водосборов 50 % обеспеченности

Масштаб	1:100 000	1:200 000	1:500 000	1: 1 000 000	1:2 000 000
р. Ай – с. Лаклы	1,37	1,38	1,31	1,35	1,31
р. Ай – с. Метели	1,40	1,40	1,34	1,38	1,36
р. Большой Ик – д. Таишево	1,33	1,31	1,24	1,19	1,21
р. Сарс – с. Султанбеково	1,23	1,25	1,19	1,21	1,19
р. Тюй – д. Гумбино	1,28	1,28	1,26	1,25	1,27
р. Уфа – Павловская ГЭС	1,43	1,45	1,42	1,48	1,47
р. Уфа – с. В. Суян	1,46	1,47	1,42	1,43	1,47
р. Юрюзань – пос. Атнаш	1,31	1,32	1,26	1,28	1,28
р. Юрюзань – д. Чулпан	1,32	1,36	1,28	1,29	1,30

На рисунке 4.11 графически интерпретирована зависимость значений фрактальной размерности соответствующих 50% обеспеченности от масштаба исследованных водосборов.

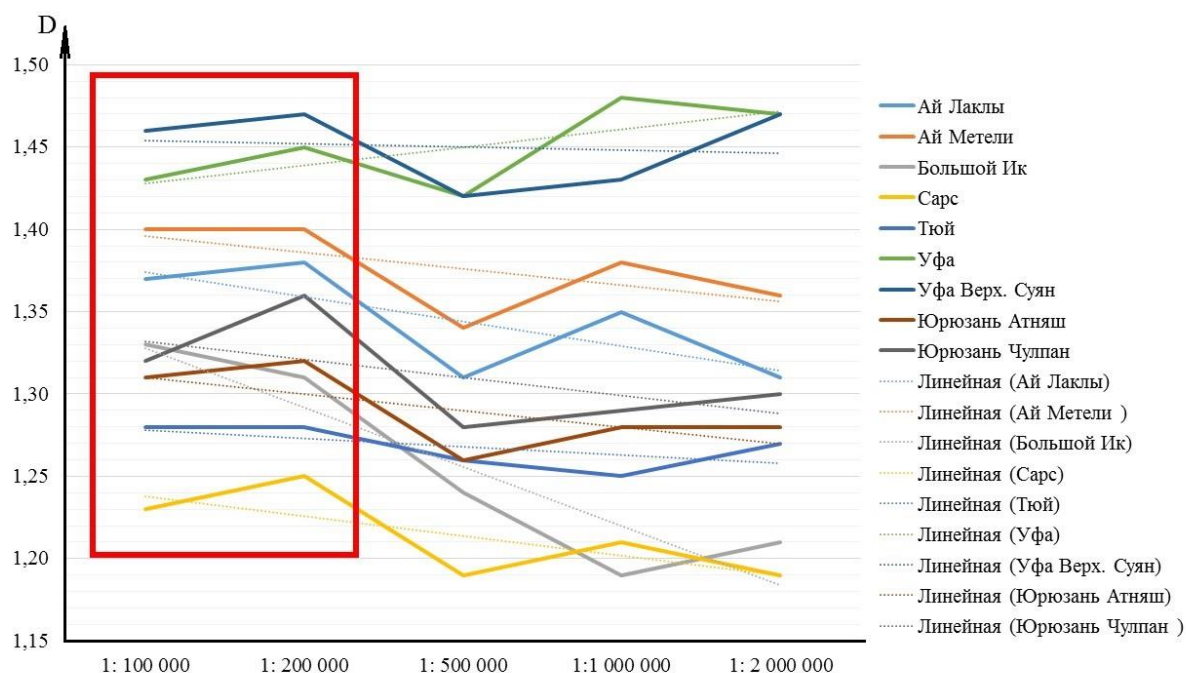


Рисунок 4.11 – Кривые изменения значений фрактальных размерностей исследуемых водосборов в зависимости от масштаба исследования (обеспеченность 50 %, для программ, вошедших в диапазон $25 \% < P < 75 \%$)

На рисунке 4.11 очевидна общая для всех графиков тенденция к небольшому увеличению фрактальной размерности (не более 6%) при укрупнении масштаба. Исключение составил водосбор р. Уфа – Павловская ГЭС, значение фрактальной размерности которого, с укрупнением масштаба, уменьшилось. График водосбора р. Уфа – с. Верхний Суян во всех масштабах исследования мало изменялся, линия тренда осталась практически параллельной оси абсцисс. График зависимости фрактальной размерности от масштаба исследования в створе р. Юрюзань – д. Чулпан соответствовал основному тренду, однако в масштабе 1:100 000 происходило снижение значений, что может быть связано с особенностями оцифровки анализируемого изображения. Реки Большой Ик и Сарс (наименьшие по площади водосборы) показали самый большой прирост фрактальных размерностей с увеличением масштаба.

Интересны изменения фрактальной размерности гидрографических сетей, принадлежащих к одному водосбору и составляющие часть друг друга. Так, например, р. Уфа – с. Верхний Суян составляет 60 % от всего водосбора р. Уфа.

Точки пересечения этих водосборов разделяли графики на 2 участка: от 1: 2 000 000 до 1: 500 000 и от 1: 500 000 до 1: 100 000. На первом участке фрактальная размерность реки р. Уфа – Павловская ГЭС больше, чем на втором – р. Уфа – с. Верхний Суян.

Водосборный бассейн р. Ай – с. Метели включает в себя водосборы: р. Ай – с. Лаклы, и приток р. Большой Ик, площади которых составляют соответственно 45% и 10% от площади большего водосбора. Величины фрактальных размерностей этих водосборов пропорциональны их площади и показывали прямую зависимость с масштабом исследования.

Водосборный бассейн р. Сарс занимает более половины водосборной территории р. Туй. Во всех масштабах исследования фрактальные размерности р. Туй выше, чем для р. Сарс. Примечательно, что график для р. Сарс полимодален.

Единственным исключением в зависимости между величинами фрактальной размерности и величиной водосбора стала р. Юрюзань. Водосбор р. Юрюзань – д. Чулпан входит в состав водосбора р. Юрюзань – пос. Атнаш, однако на всех исследуемых масштабах значения фрактальных размерностей р. Юрюзань – пос. Атнаш стабильно больше. Это объясняется особенностью рельефа и малоразвитой гидрографической сетью на участке между д. Чулпан – пос. Атнаш.

Особенность рисунка 4.11 заключалась в резком снижении значений фрактальных размерностей в масштабе 1: 500 000, что, по-видимому, связано с качеством исходного изображения. На участке 1: 200 000 до 1: 100 000 большинство графиков принимало вид линейной зависимости.

В целях численной оценки степени инвариантности фрактальной размерности составлены уравнения кривых изменения значений фрактальных размерностей 50%-ной обеспеченности для всех масштабов исследования и для двух наибольших масштабов (1:200 000 и 1:100 000) (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Уравнения кривых изменения значений фрактальных размерностей 50% обеспеченности

Данные по водосборам	Уравнение кривой для 5 масштабов исследования	Уравнение кривой для масштабов 1:200 000 и 1:100 000
р. Ай – с. Лаклы	$y = 0,015x + 1,299$	$y = -0,01x + 1,39$
р. Ай – с. Метели	$y = 0,01x + 1,346$	$y = 1,4$
р. Большой Ик – д. Таишево	$y = 0,036x + 1,148$	$y = 0,02x + 1,29$
р. Сарс – с. Султанбеково	$y = 0,012x + 1,178$	$y = -0,02x + 1,27$
р. Тюй – д. Гумбино	$y = 0,005x + 1,253$	$y = 1,28$
р. Уфа – Павловская ГЭС	$y = -0,011x + 1,483$	$y = -0,02x + 1,47$
р. Уфа – с. В. Суян	$y = 0,002x + 1,444$	$y = -0,01x + 1,48$
р. Юрюзань – пос. Атнаш	$y = 0,01x + 1,26$	$y = -0,01x + 1,33$
р. Юрюзань – д. Чулпан	$y = 0,011x + 1,277$	$y = -0,04x + 1,4$

Уравнения, описывающие изменения фрактальных размерностей в двух наибольших масштабах имели либо отрицательный тангенс угла наклона, стремящийся к нулю, что говорит об незначительном снижении показателей фрактальной размерности при переходе с 1:200 000 к 1:100 000. В некоторых случаях уравнения задавались прямыми (в случае р. Ай — с. Метели и р. Тюй — д. Гумбино), что свидетельствует о достижении масштабной инвариантности на участке графика 1:100000—1:200000, т. е. независимости значений от масштаба исследования. Таким образом, минимальным достаточным масштабом гидрографической сети для расчета фрактальной размерности является масштаб 1: 200000.

4.5.4 Оценка влияния изменения взаимного расположение расчетной сетки и исследуемого объекта

Оценка влияния взаимного расположения расчетной сетки и исследуемых водосборов производилась на примере р. Ай — с. Лаклы. Для этого каждое

изображение водосбора последовательно поворачивалось по часовой стрелке на 45° относительно центра. С каждым поворотом производился расчет фрактальной размерности в программе АРФР. Исследование велось для всех 5 масштабов исследования, результаты представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Результаты расчета фрактальной размерности водосбора р. Ай — с. Лаклы при изменении взаимного расположения расчетной сетки и исследуемого объекта

Масштаб	1:100000	1:200000	1:500000	1:1000000	1:2000000
Положение	D	D	D	D	D
0°	1,37	1,39	1,31	1,34	1,34
45°	1,41	1,41	1,34	1,38	1,37
90°	1,37	1,39	1,31	1,35	1,34
135°	1,41	1,42	1,34	1,38	1,37
180°	1,36	1,39	1,31	1,35	1,34
225°	1,41	1,42	1,34	1,38	1,37
270°	1,37	1,39	1,31	1,34	1,34
315°	1,41	1,41	1,36	1,38	1,37
$\delta\%^*$	2,92	1,44	2,29	2,99	2,24

Примечание. * - относительная погрешность измерений между 0° и 45°

Как видно из таблицы 4.10, рассчитанные величины фрактальной размерности исследуемого водосбора при повороте изображения на 90° , 180° , 270° (в рамках одного масштаба) практически не изменялись, тогда как при поворотах на 45° , 135° , 225° и 315° величины фрактальной размерности увеличивались на 1,5—3 %.

Для обеспечения единого подхода при расчете фрактальной размерности предлагается использовать изображение водосбора, сохраняя его географическую ориентацию.

Результатом проведенных исследований стали следующие методологические рекомендации:

- для расчета фрактальной размерности предлагается использовать растровое изображение водосборов разрешением 100 dpi;
- минимальным достаточным масштабом исследуемого водосбора является 1:200000;
- для минимизации субъективного фактора предлагается применять АРФР;
- при расчёте расчетная сетка накладывается на прямую проекцию гидрографической сети без поворотов.

4.6 Фрактальная размерность как интегральный показатель самоочищающей способности водного объекта

Впервые предложено использование фрактальной размерности гидрографической сети в качестве интегрального показателя состояния водосбора, объединяющего в себе информацию: о разветвленности речной сети, водности водосборной территории (коэффициент наводнений), о расходах воды в реках.

4.6.1 Определение доли рек с длинами заданного диапазона на основе фрактальной размерности водосборного бассейна

Качество воды в реках зависит от водности (разбавление), извилистости и разветвленности (оседание наносов, трансформация, окисление загрязняющих веществ). Разветвленность гидрографической сети увеличивается благодаря наличию малых рек. Они выполняют функции регулятора водного режима ландшафтов, поддерживая равновесие и перераспределение влаги, определяя гидрологическую и гидрохимическую специфику средних и больших рек [204]. Малые реки составляют 80-90% от общего количества рек и оказывают существенное влияние на формирование качества воды более крупных водных

объектов, поддерживая в них устойчивое равновесие и перераспределение влаги на поверхности рельефа.

Чем больше малых рек, тем интенсивнее будет проходить разбавление загрязненных вод, поэтому доля малых рек водосбора является косвенным показателем способности водотоков к самоочищению.

Поскольку речная сеть имеет фрактальную природу, это означает, что с увеличением значений фрактальной размерности D в древовидном рисунке речной сети начинают все более и более доминировать реки относительно малой длины. На основании этого в работе [53] предложено определять доли рек с длинами в заданном диапазоне, используя фрактальную размерность водосбора

$$P = \left(\frac{\delta_1}{\delta_0} \right)^{1-D} - \left(\frac{\delta_2}{\delta_0} \right)^{1-D} \quad (4.2)$$

(формула 4.2).

где, P - соотношение рек с длинами заданного диапазона, %

δ_1 и δ_2 – верхняя и нижняя граница исследуемого диапазона длин рек, км

δ_0 – длина единичного измерительного отрезка, км;

D – фрактальная размерность водосбора.

То есть, зная фрактальную размерность гидрографической сети, можно определить в ней долю рек разной длины, в том числе малых рек. Данная зависимость апробирована на водосборных бассейнах рек Белая и Уфа. С помощью программы АРФР в масштабе 1: 200 000 определена фрактальная размерность этих водосборов, которая составила 1,51 и 1,46 соответственно. Длина единичного измерителя δ_0 составила 1 км. Диапазон длин рек (δ_1 и δ_2) ограничен длинами водотоков от 1 км до 100 км. Данные о количестве рек разной длины для исследуемых водосборов получены из научно-прикладного справочника «Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы» [205].

Результаты расчета процентного соотношения рек с длинами, принадлежащими диапазону 1-100 км, рассчитанные на основе фрактальной размерности водосборного бассейна (P), действительные значения, полученные по справочным данным ($P_{\text{дейст.}}$), а также величины относительных погрешностей ($\delta_{\text{отн.}}$) между P и $P_{\text{дейст.}}$ приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчетные (P) и действительные ($P_{\text{дейст.}}$) [205] значения процентного соотношения рек с длинами заданного диапазона (1-100 км), полученные на основе фрактальной размерности

Водосбор реки	D	δ_0	δ_1	δ_2	$P, \%$	$P_{\text{дейст.}}, \%$	$\pm \delta_{\text{отн.}}, \%$
Белая	1,51	1	1	100	90	88	2,27
Уфа	1,46	1	1	100	88	91	3,30

Как видно из таблицы 4.11, фрактальная размерность позволила достаточно точно (с точностью 3,3%) определить долю малых рек в исследуемых водосборах.

Для сокращения времени расчёта авторами написана программа «Определение доли рек с длинами заданного диапазона на основе фрактальной размерности водосборного бассейна» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614257 от 10.04.2017).

4.6.2 Фрактальная модель водности водосбора на примере бассейна р. Уфа

При оценке геоэкологического риска важным фактором является обеспеченность территории водными ресурсами. С одной стороны, высокая степень обводненности территории представляет возможность для развития населенных пунктов, диверсификации экономической деятельности, развитие сельского хозяйства и гидроэнергетики. С другой стороны, избыточная или недостаточная водность урбанизированной территории провоцируют

возникновение опасных природно-техногенных процессов: маловодий и наводнений.

В России ежегодно происходит от 40 до 70 кризисных наводнений. По данным Росгидромета наводнениям подвержены около 500 тыс. км², а наводнениям с катастрофическими последствиями – 150 тыс. км², где расположены порядка 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов и более 7 млн. га сельскохозяйственных угодий. Среднегодовой ущерб от наводнений оценивается примерно в 40 млрд. руб. [206].

Существует достаточно много методик прогнозирования наводнений и паводков, однако основным их недостатком является большой объем требуемых входных данных: многолетних гидрологических, метеорологических наблюдений, подробные карты местности, учет физико-географических особенностей и др. Сбор подобной информации для моделирования периодов высокой водности затруднителен, в частности при освоении территорий с недостаточной гидрологической изученностью. Основным требованием к прогнозной модели высокой водности для территорий с недостаточной гидрологической изученностью является возможность быстрой оценки большой площади, выявление и районирование потенциально опасных участков водосборов, используя доступную входную информацию. Определение водности на территории водосборного бассейна р. Уфа через определение коэффициента наводнений Θ , осуществлялось по методике, изложенной в работе [207]. Методика основывается на двух положениях:

- 1) речная система имеет фрактальный характер и степень ее развитости и разветвленности определяется фрактальной размерностью;
- 2) развитость речной сети напрямую связана с количеством водных ресурсов на территории.

Согласно модели мультифрактальной динамики, уровень поднятия воды Δh равен средней скорости подъема X умноженное на среднее время подъема T .

Средняя скорость подъема X является функцией фрактальной размерности D речной системы на данной территории ($\Delta h = X \cdot T$). В рамках линейного приближения $\Delta h = \eta \cdot T \cdot (D - D_0)$, обозначался как $k = \eta \cdot T$.

Где η – коэффициент учитывающий величину снежного покрова, скорость таяния снегов, количество осадков во время паводков и т.д.

$$\text{Тогда} \quad \Delta h = k \cdot (D - D_0) \quad (4.3)$$

где: D_0 и k – коэффициенты модели, подбираемые из условия наилучшего приближения формулы (1) к опытным данным. В качестве допущения в методике [207] предложено использовать $D_0 = 1$ и $k = 1$.

Коэффициент наводнений Θ определялся как отношение подъема воды на i -ом участке водосборной территории Δh_i к минимальному подъему воды для данной территории Δh_2 .

$$\Theta = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_2} = \frac{(D_i - 1)}{(D_2 - 1)} \quad (4.4)$$

где: D_i – фрактальная размерность i -ого участка,

D_2 – минимальное значение из всех полученных результатов фрактальной размерности на исследуемом водосборе.

Для оценки водности водосборного бассейна р. Уфа гидрографическая сеть в масштабе 1: 200 000 покрывалась сеткой с размером ячейки в полградуса. Площадь покрытия составила 29 квадратов. Для каждого i -ого участка с помощью программы АРФР, рассчитывалась фрактальная размерность D_i . Минимальное значение фрактальной размерности D_2 , для исследуемой территории составило 1,24. На рисунке 4.12 представлено распределение значений фрактальной размерности исследуемого водосбора р. Уфа и границы бассейнов ее основных притоков.

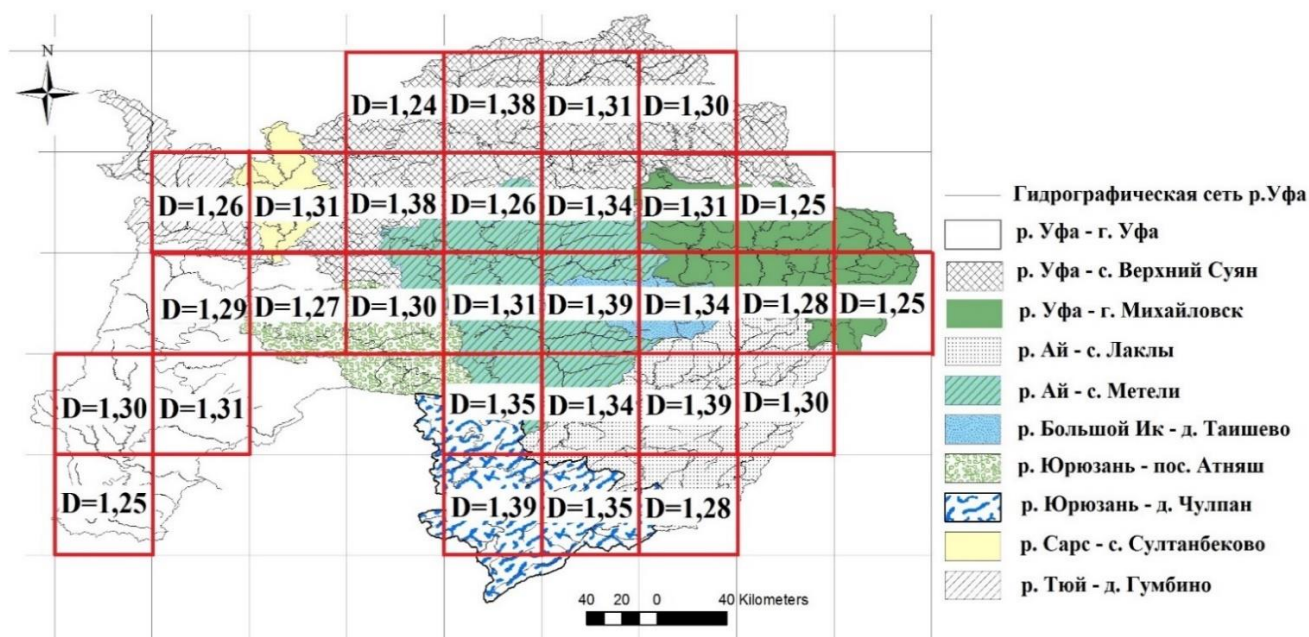


Рисунок 4.12 – Распределение фрактальной размерности речной сети по водосборной территории р. Уфа

Далее по формуле 4.8 определены значения коэффициента наводнений Θ для каждого участка. Полученные значения графически интерпретированы на рисунке 4.13.

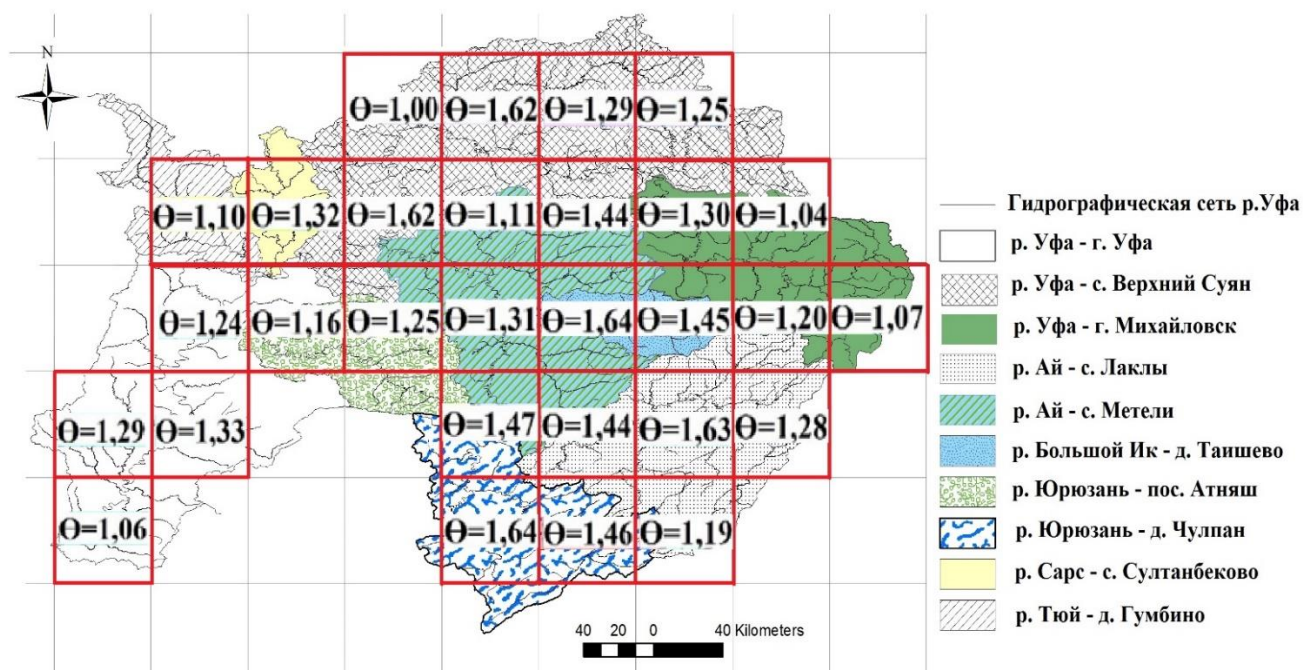


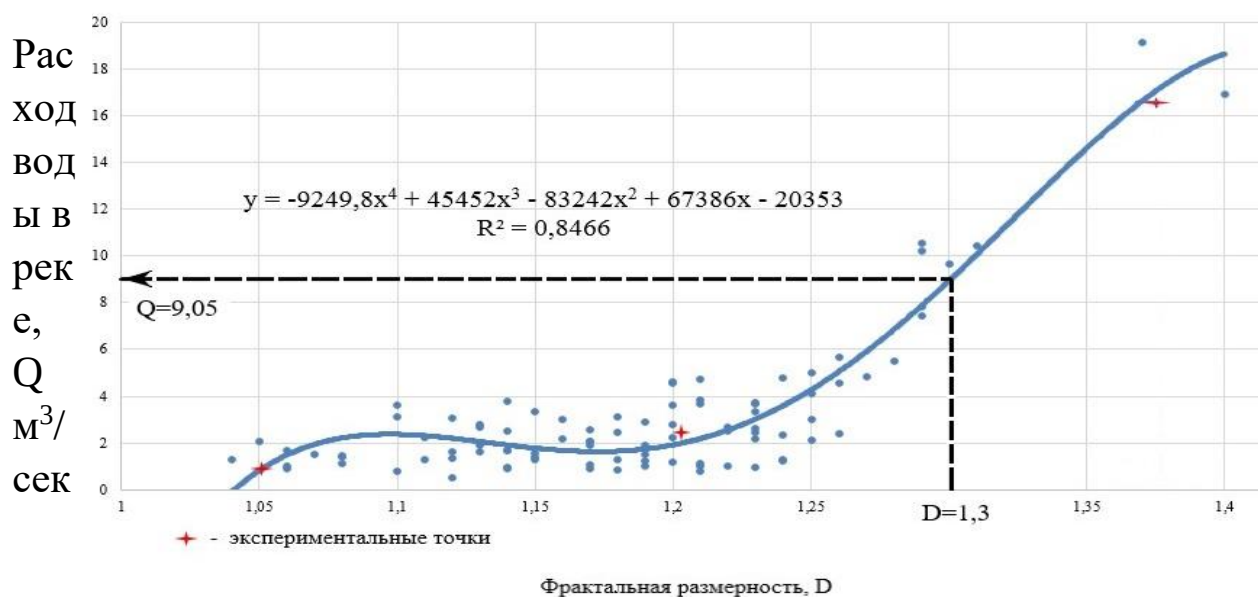
Рисунок 4.13 – Распределение коэффициента водности Θ по водосборной территории р. Уфа

Как видно на рисунке 4.13 коэффициент наводнений неравномерно распределен по территории водосбора р. Уфа. Наибольшие значения Θ характерны для водосборов с замыкающими створами в: р. Юрюзань – пос. Атнаш, р. Большой Ик, р. Ай и р. Уфа – с. Верхний Суян, наименьшие – для верховья р. Уфа, р. Тюй – д. Гумбино и р. Уфа близь устья. Полученные результаты позволили провести районирование водосборной территории по степени обводненности, что может служить основой для разработки мероприятий по снижению последствий опасных природно-техногенных процессов, планирования геоинженерной защиты территорий, зданий и сооружений [150].

4.6.3 Определение зависимости между фрактальной размерностью гидрографической сети и расходами воды в реках

Как отмечалось ранее фрактальная размерность характеризует степень сложности гидрографической сети и ее разветвленность. В этой связи вероятно предположить, что существует зависимости между фрактальной размерностью и расходом воды в реках.

В целях проверки настоящей гипотезы для каждой из 101 малой реки, полученной при сопоставления слоя синтетических рек и слоя реальной гидрографии рек бассейна р. Уфа определялись границы водосборных территорий и выделялись гидрографические сети для каждого водосбора. С помощью программы АРФР, согласно предложенной ранее методике, рассчитывалась фрактальная размерность каждого исследуемого водосбора. Результаты расчета среднемноголетнего расхода и фрактальной размерности для 101 исследуемых водотоков сведены в таблицы Приложение Б. Зависимость между фрактальной размерностью D и расходом графически интерпретированы на рисунке 4.14.



Фрактальная размерность, D

Рисунок 4.14 - Зависимость расхода воды в исследуемых реках от фрактальной размерности

Как видно (рисунок 4.14) между фрактальной размерностью D и расходом воды Q в исследуемых водотоках существует очевидная взаимосвязь, которая описывается полиномом 4 степени, коэффициент достоверности аппроксимации составляет $R=0,85$. Таким образом установленная зависимость подтвердила предположение о том, что по значениям фрактальной размерности D можно определять расход воды в реках при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. Относительная погрешность между действительным и расчетным значением расхода воды находится в пределах $\pm 12\%$.

Результаты и выводы по главе 4

1. Приведен сравнительный анализ программ для расчета фрактальной размерности методом box-counting находящихся в открытом доступе FrakOut, HarFa, Frac, Imagej, Frac_Lac, QGIS. Для устранения недостатков, имеющих в существующих программах авторами разработана программа Автоматизированный расчет фрактальной размерности (АРФР). Основными отличиями АРФР от аналогов является: автоматическая обработка и

минимизация субъективного фактора при определении фрактальной размерности, возможность работы с изображениями в формате jpg, отсутствие влияния цветового диапазона исследуемого изображения на результаты расчета, снижение трудозатрат при расчете.

2. Рассчитаны значения фрактальной размерности 9 водосборов, относящихся к бассейну р. Уфы: р. Ай — с. Лаклы, р. Ай — с. Метели, р. Большой Ик — д. Таишево, р. Сарс — с. Султанбеково, р. Тюй — д. Гумбино, р. Уфа — г. Уфа, р. Уфа — с. Верх. Суян, р. Юрюзань — пос. Атряш, р. Юрюзань — д. Чулпан. Расчет производился в 5 различных масштабах: 1:100000; 1:200000; 1:500000; 1:1000000; 1:2000000, с использованием 7 программ: FrakOut, HarFa, Frac, Imagej, Frac_Lac, QGIS, АРФР. В рамках настоящего исследования получено 675 значений фрактальных размерностей.

3. Разработана методология определения фрактальной размерности водосборной территории методом box – counting. Для расчета фрактальной размерности предлагается использовать растровое изображение водосборов разрешением 100 dpi. Минимальным достаточным масштабом исследуемого водосбора является 1:200000. Для минимизации субъективного фактора предлагается применять АРФР. При расчёте географическая ориентация изображения водосбора сохраняется, т. е. расчетная сетка накладывается на прямую проекцию гидрографической сети без поворотов. ПК должен соответствовать системным требованиям для MATLAB R2020b.

4. Впервые фрактальная размерность предложено рассматривать в качестве интегрального показателя состояния водосбора, объединяющего в себе информацию: о разветвленности речной сети, водности водосборной территории (коэффициент наводнений), о расходах воды в реках.

Глава 5. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления водными ресурсами

Одним из трендов цифровой экономики является управление на основе данных, т.е. выстраивания систем таким образом, чтобы собирать совокупность необходимых данных, анализировать их и принимать решения на основе анализа. В управлении водными ресурсами задача усложняется тем, что данные собираются различными организациями и ведомствами в различных форматах (текст, изображение, сигналы и др.).

На основе методики оценки геоэкологического риска [160] разработана система поддержки принятия решения при управлении водными ресурсами. Для апробации методики выбрана территория водосборного бассейна р. Уфа и муниципальные образования (МО), расположенные на этой территории. На территории водосборного бассейна р. Уфа расположены 40 муниципальных образований (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Перечень муниципальных образований, расположенных на территории [151, 160]

№	Название муниципального образования	Площадь*, км ²	Плотность населения, чел/км ²
Пермский край			
1	Чернушинский район	318	30,03
2	Октябрьский район	1909	7,81
Челябинская область			
3	Ашинский район	328	20,58
4	Катав-Ивановский район	2032	8,44
5	Саткинский район	650	32,54
6	Нязепетровский район	468	4,63
7	Кусинский район	1473	17,24
8	Златоустовский городской округ	1706	87,59
9	Верхнеуфалейский городской округ	1259	18,83
10	Карабашский городской округ	215	16,07
11	Кыштымский городской округ	204	50,8
12	Каслинский район	106	11,10
13	Усть-Катавский ГО	51	36,58
14	Трехгорный ГО	163	200,40

№	Название муниципального образования	Площадь*, км ²	Плотность населения, чел/км ²
Республика Башкортостан			
15	Уфимский район	253	54,86
16	Бирский район	15	36,40
17	Мишкинский район	168	13,87
18	Балтачевский район	24	11,88
19	Благовещенский район	1865	21,86
20	городской округ Уфа	392	1586,06
21	Иглинский район	984	24,75
22	Аскинский район	1958	7,42
23	Нуримановский район	128	8,10
24	Караидельский район	763	6,74
25	Салаватский район	870	11,09
26	Белорецкий район	506	9,00
27	Дуванский район	65	9,54
28	Мечетлинский район	1561	14,76
29	Кигинский район	1607	10,21
30	Белокатайский район	2748	6,05
31	Учалинский район	64	15,82
Свердловская область			
32	Красноуфимский городской округ	2684	7,40
33	Ачитский городской округ	1646	7,46
34	Шалинский городской округ	105	3,99
35	Артинский городской округ	2779	9,84
36	Нижнесергинский район	3543	10,65
37	Бисертский городской округ	1232	7,69
38	городской округ Первоуральск	59	69,65
39	городской округ Ревда	102	57,10
40	Полевской городской округ	126	44,23

*- указана площадь МО, расположенная в границах водосборной территории р. Уфа

Карта – схема водосборов и административно – территориального деления водосборного бассейна р. Уфа представлена на рисунке 5.1.

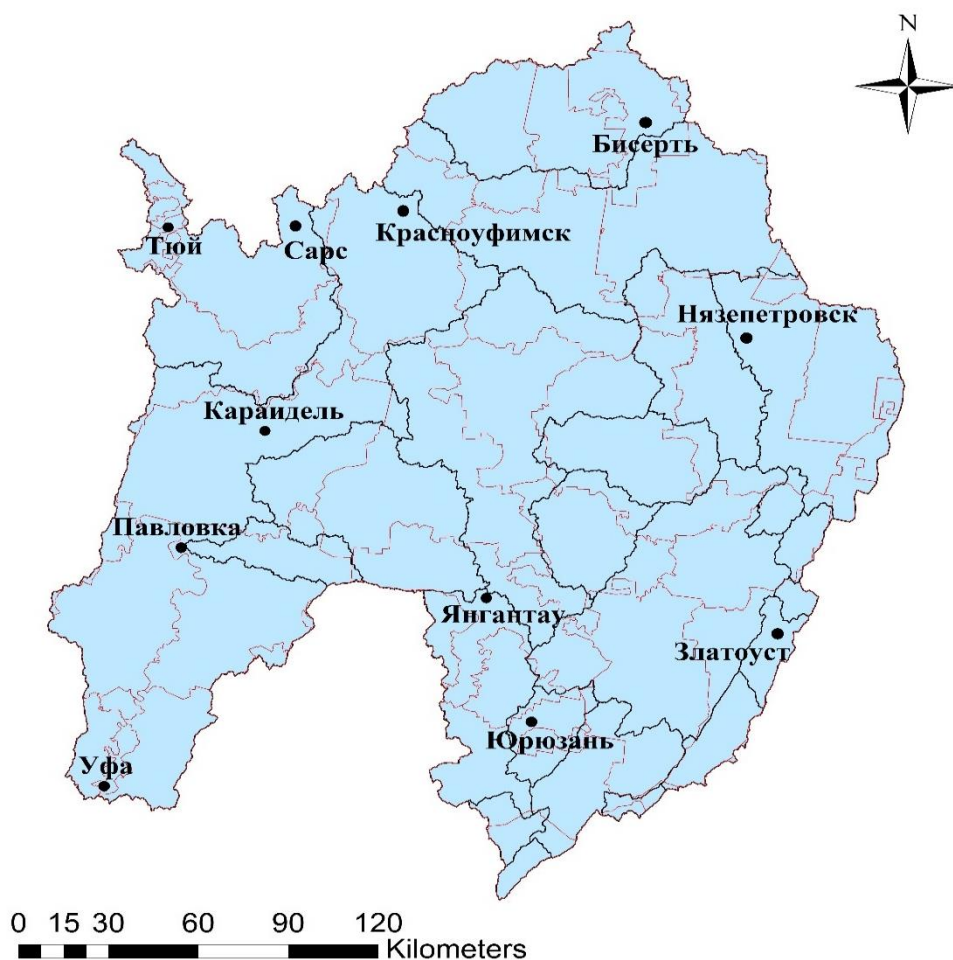


Рисунок 5.1 – Карта схема водосборного бассейна р. Уфа
 красные линии - административно –территориальные границы
 черные линии – границы водосборных бассейнов

Как видно по рисунку 5.1 границы водосборов и муниципальных образований не совпадают. Одна административно-территориальная единица может быть расположена на территории нескольких водосборов.

В качестве входных данных в настоящей работе использованы: гидрологические, гидрохимические показатели водотоков, пространственные данные, относящихся к водосборному бассейну р. Уфа, а также демографические данные.

5.1 Методика определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно – территориальных единиц

Расчет геоэкологического риска истощения и загрязнения водных ресурсов в настоящей работе основывается на способе определению риска длительного (хронического) воздействия подробно описан в Главе 1. Для определения риска истощения и загрязнения водных объектов на территории административно – территориальных единиц, изложенная выше методика нуждается в преобразовании. В частности, все параметры, учитываемые в методике, пересчитываются на масштаб исследуемой административно –территориальной единицы (район, область, округ и др.) В настоящем исследовании расчет осуществлялся для муниципальных образований, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфа. Перечень преобразований методики определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно – территориальных единиц приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Перечень преобразований методики определения риска истощения и загрязнения водных объектов для административно – территориальных единиц [208]

Обозначение параметра	Источник	Адаптация для муниципальных образований
$V_{\text{пов}}$ и $V_{\text{под}}$	1. Росстат - Численность населения РФ по муниципальным образованиям на 1 января 2020 г. 2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды РФ» - Данные по бытовому водопотреблению на	1. Определяем население в каждом исследуемом муниципальном образовании (МО) 2. По данным структуры водопользования определяем объемы бытового водопотребления для каждого МО (произведение объёма душевого бытового водопотребления и количества

	душу населения	человек, проживающих на территории каждого МО)	
S _{вдс}	1. Электронные карты Карта водосборных бассейнов Административно – территориальная карта	1. Определяем площади каждого водосборного бассейна, находящегося на территории МО Так как административно-территориальные границы и границы водосборов зачастую не совпадают, то МО может включать в себя несколько частей площадей водосборных бассейнов	
Q _{год ст}	1. Гидрологический ежегодник Уральского и Башкирского отделения Гидрометцентра Данные о расходах воды в реках на исследуемой территории [152]	1. Определяем среднее многолетнее значение расхода для каждого исследуемого водосбора 2. Определяем модуль стока М для каждого водосборного бассейна (отношение расхода к площади водосбора) 3. Определяем годовой сток каждого МО, как сумму произведений модуля стока каждого конкретного бассейна на площадь доли этого бассейна, принадлежащего каждому МО	
K _{исп}	1. Электронные карты типов почв Виды землепользования	Определяем коэффициент по совокупности факторов для каждого МО	
K _п	K _п зависит от K _{исп} Значение поправочного коэффициента в зависимости от коэффициента истощения	K _{ист}	K _п
		0,1-0,5	0,5
		0,5-1,0	1,0
		1,0-1,5	1,5
		1,5-2,0	2,0
		2,0-2,5	2,5
УКИЗВ	1. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан	1. По данным докладов о состоянии окружающей среды определяются среднемноголетние значения УКИЗВ	

	в 2011- 2019 году [209] 2. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2017-2019 году 3. Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2007-2016 году [210] 4. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края» 2000 -2018 гг. [211] 5. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2010-2019 гг. [212]	2. Значения УКИЗВ интерполируются на территории водосборного бассейна 3. Определяется среднее многолетнее значение УКИЗВ для каждого муниципального образования.															
$K_{\text{зап}}$	коэффициент запаса, принимаемый равным 10 [2];																
K_z	коэффициент загрязнения зависит от значений УКИЗВ. Значение поправочного коэффициента в зависимости от УКИЗВ [2]	<table> <tr> <th>УКИЗВ</th><th>Характеристика</th><th>K_z</th></tr> <tr> <td>0,2-1,0</td><td>очень чистые, чистые</td><td>0,5</td></tr> <tr> <td>1,0-4,0</td><td>умеренно загрязненные, загрязненные</td><td>1,0</td></tr> <tr> <td>4,0-10,0</td><td>грязные, очень грязные</td><td>1,5</td></tr> <tr> <td>> 10,0</td><td>чрезвычайно грязные</td><td>2,0</td></tr> </table>	УКИЗВ	Характеристика	K_z	0,2-1,0	очень чистые, чистые	0,5	1,0-4,0	умеренно загрязненные, загрязненные	1,0	4,0-10,0	грязные, очень грязные	1,5	> 10,0	чрезвычайно грязные	2,0
УКИЗВ	Характеристика	K_z															
0,2-1,0	очень чистые, чистые	0,5															
1,0-4,0	умеренно загрязненные, загрязненные	1,0															
4,0-10,0	грязные, очень грязные	1,5															
> 10,0	чрезвычайно грязные	2,0															

5.2 Определение риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфа

Водопотребление для каждого муниципального образования, расположенного на водосборной территории р. Уфа определяется из государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». Для каждого субъекта РФ этот показатель

разный. Для примера, на рис. 5.2 в виде графика приведена структура водопотребления Республики Башкортостан в период 2010 – 2018 гг.



Рисунок 5.2 - Структура водопользования [213]

Поправочный коэффициент $K_{исп}$ определялся в зависимости от геологической структуры поверхности. Поправочный коэффициент геологической структуры поверхности, содержащей карстовые осадочные породы, принят как 1,5, не содержащей данный тип геологических пород – 1. Для определения наличия карста на водосборной территории р. Уфа использованы карты ресурса Всероссийского научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского [157].

Результаты расчета риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфа сведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 - Результаты расчета риска истощения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфа [208]

№		Q муниципал. м ³ /сек	Водопотребление на душу населения тыс. м ³ /км ² /чел.	Водопотребление в муниципалитете тыс. м ³ /км ²	K _{исп}	K _{ист}	K _п	Risk _{ист}
	Пермский край							
1	Чернушинский район	1,78	45,00	429729,30	1,5	0,51	0,5	0,0431
2	Октябрьский район	11,25	45,00	701142,75	1,5	0,02	0,5	0,0018
	Челябинская область							
3	Ашинский район	3,77	59,00	398264,16	1,0	0,32	0,5	0,0277
4	Катав-Ивановский район	23,37	59,00	1011854,72	1,0	0,02	0,5	0,0019
5	Саткинский район	18,51	59,00	4611503,72	1,5	0,07	0,5	0,0060
6	Нязепетровский район	21,87	59,00	948173,07	1,0	0,01	0,5	0,0011
7	Кусинский район	9,66	59,00	1551169,00	1,5	0,07	0,5	0,0061
8	Златоустовский городской округ	13,65	59,00	8816283,86	1,0	0,38	0,5	0,0325
9	Верхнеуфалейский городской округ	9,19	59,00	1398711,23	1,5	0,08	0,5	0,0070
10	Карабашский городской округ	1,57	59,00	203847,95	1,5	0,40	0,5	0,0345
11	Кыштымский городской округ	1,49	59,00	611428,80	1,5	1,34	1,5	0,2960
12	Каслинский район	0,77	59,00	69419,40	1,5	0,56	0,5	0,0480
13	Усть-Катавский ГО	7,57	59,00	1454640,28	1,0	0,29	0,5	0,0245
14	Трехгорный ГО	1,87	59,00	1927246,80	1,0	6,31	2,5	0,9360
	Башкортостан							
15	Уфимский район	1,91	44,00	610701,52	1,5	0,84	1,0	0,1366
16	Бирский район	0,11	44,00	24024,00	1,5	9,43	2,5	0,9836
17	Мишкинский район	1,27	44,00	102527,04	1,5	0,32	0,5	0,0276
18	Балтачевский район	0,18	44,00	12545,28	1,5	1,92	2,0	0,4886
19	Благовещенский район	14,08	44,00	1793831,60	1,5	0,05	0,5	0,0040
20	городской округ Уфа	2,96	44,00	27356362,88	1,5	15,72	2,5	0,9989
21	Иглинский район	7,43	44,00	1071576,00	1,5	0,10	0,5	0,0085
22	Аскинский район	14,78	44,00	639247,84	1,5	0,01	0,5	0,0013
23	Нуримановский район	15,54	44,00	919155,60	1,5	0,02	0,5	0,0013
24	Караидельский район	27,59	44,00	1088078,64	1,5	0,01	0,5	0,0006
25	Салаватский район	15,87	44,00	1057897,28	1,0	0,03	0,5	0,0027
26	Белорецкий район	5,82	44,00	200376,00	1,0	0,07	0,5	0,0059
27	Дуванский район	22,79	44,00	1360861,92	1,5	0,01	0,5	0,0011
28	Мечетлинский район	9,83	44,00	1013775,84	1,5	0,04	0,5	0,0038
29	Кигинский район	10,12	44,00	721928,68	1,0	0,04	0,5	0,0039

№		Q муниципал. м³/сек	Водопотребление на душу населения тыс. м³/км²/чел.	Водопотребление в муниципалитете тыс. м³/км²	K _{исп}	K _{ист}	K _п	Risk _{ист}
30	Белокатайский район	20,03	44,00	833472,20	1,0	0,01	0,5	0,0012
31	Учалинский район	1,28	44,00	44549,12	1,0	0,54	1,0	0,0905
	Свердловская область							
32	Красноуфимский городской округ	17,45	73,00	1449896,80	1,5	0,02	0,5	0,0018
33	Ачитский городской округ	11,69	73,00	896378,68	1,5	0,03	0,5	0,0027
34	Шалинский городской округ	0,75	73,00	30583,35	1,0	0,39	0,5	0,0335
35	Артинский городской округ	18,06	73,00	1996211,28	1,5	0,03	0,5	0,0023
36	Нижнесергинский район	25,16	73,00	2754505,35	1,5	0,02	0,5	0,0018
37	Бисертский городской округ	8,75	73,00	691607,84	1,5	0,04	0,5	0,0037
38	городской округ Первоуральск	0,42	73,00	299982,55	1,5	8,09	2,5	0,9706
39	городской округ Ревда	0,72	73,00	425166,60	1,5	3,84	2,5	0,8122
40	Полевской городской округ	0,79	73,00	406827,54	1,5	2,71	2,5	0,6933

5.3 Определение зависимости расходов воды в реках от фрактальной размерности гидрографической сети в границах административно – территориального деления

На основании результатов подтвержденной взаимосвязи фрактальной размерности D и расхода воды в реках Q , представленных в Главе 4, предполагается, что фрактальная размерность гидрографической сети и расход воды в реках в границах муниципального образования также могут быть связаны. Для проверки этой гипотезы (о связи фрактальной размерности D и Q год. ст. в границах муниципального образования) гидрографическая сеть р. Уфа была разделена на 40 фрагментов по границам каждого муниципального образования. Для каждого фрагмента определялась фрактальная размерность согласно методики описанной в Главе 4. Результаты расчета фрактальной размерности представлены в виде графика на рисунке 5.4.

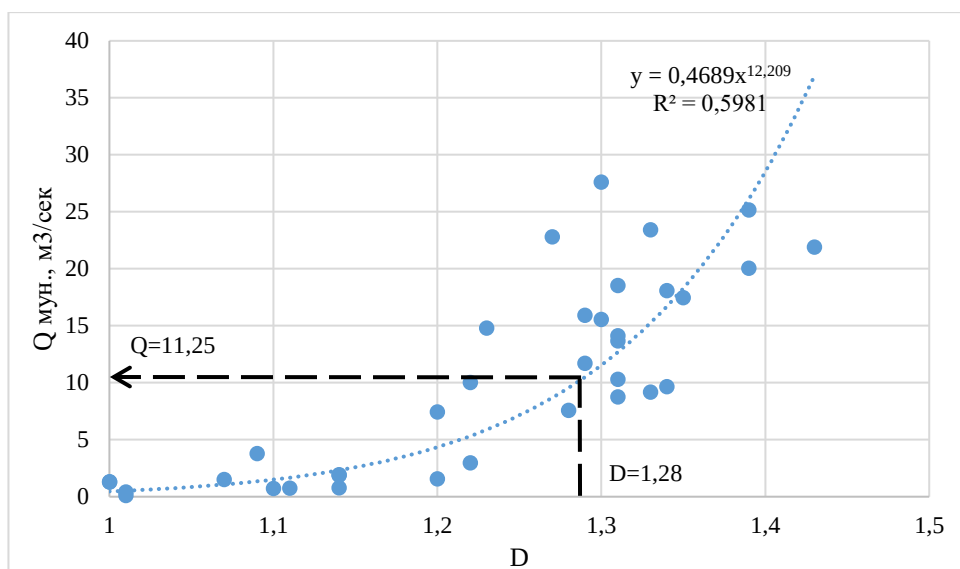


Рисунок 5.4 - Зависимость расхода воды в реках в пределах муниципального образования от значений их фрактальной размерности

Проверка адекватности и точности показала, что относительная погрешность между фактическими и расчетными значениями расхода воды находится в пределах $\pm 15\%$. Коэффициентом достоверности аппроксимации R^2 составил 0,79, что несколько меньше, чем результат, полученный при исследовании зависимости Q и D для водосборов, что, по-видимому, связано с меньшим количеством данных в исследуемой выборке. Для упрощения определения риска истощения водных ресурсов предлагается определять Q по значениям D .

5.4 Определение риска загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований

Одним из коэффициентов, необходимых для определения риска загрязнения, является УКИЗВ, в настоящем исследовании – удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков (данные получены из УКИЗВ) определялся по средним многолетним данным ежегодных государственных докладов о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан, Пермского края, Челябинской области и Свердловской области

[209-212], а также ежемесячных проб воды, опубликованные в материалах Государственного водного кадастра [153].

Так как качество воды определяется в ограниченном количестве створов, данные УКИЗВ интерполированы на водосборную территорию р. Уфа (рисунок 5.5).

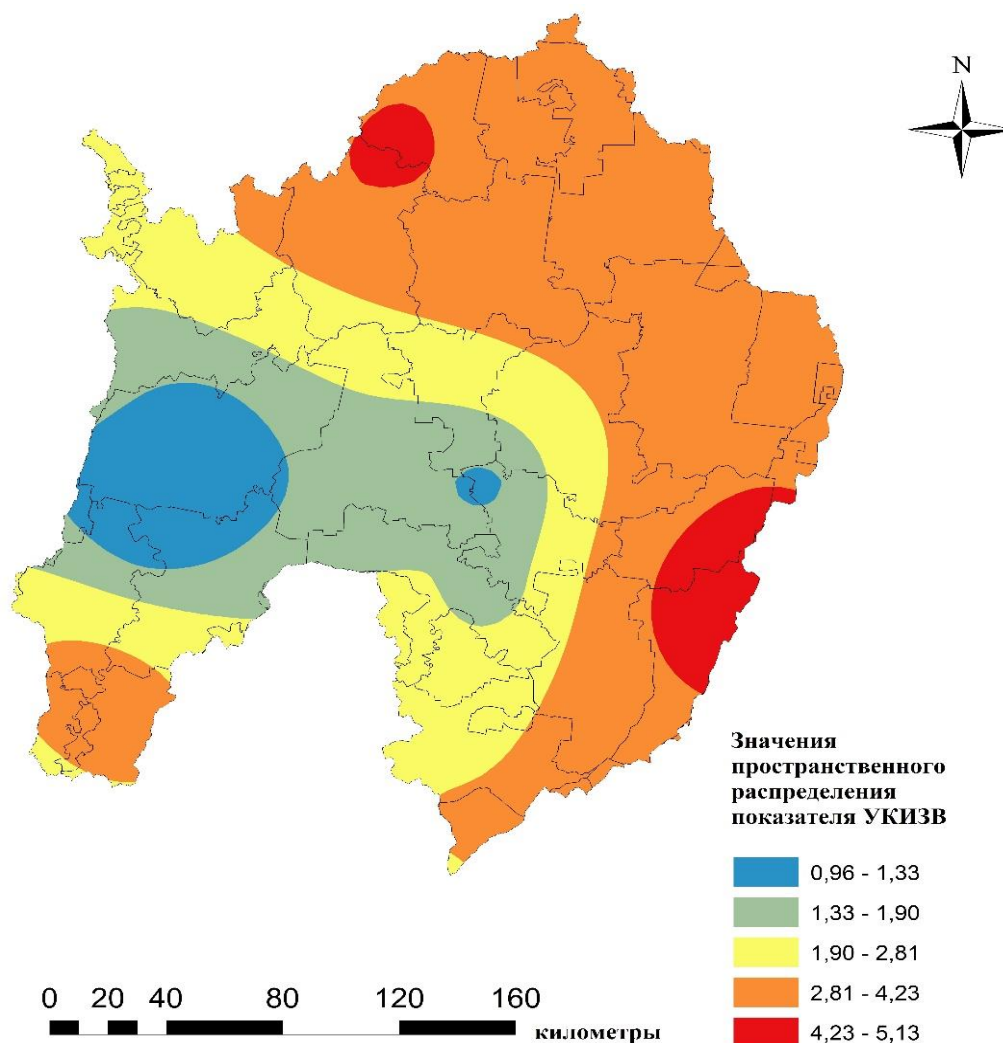


Рисунок 5.5 – Схема пространственного распределения показателя УКИЗВ по муниципальным образованиям, расположенным на территории водосборного бассейна р. Уфы.

По результатам интерполяции данных УКИЗВ определены средние значения этого показателя для каждого муниципального образования. Полученные значения приведены в таблице 5.4.

5.5 Определение средневзвешенного геоэкологического риска истощения и загрязнения водных объектов на территории муниципальных образований

В таблице 5.4 приведены результаты средневзвешенного геоэкологического риска истощения и загрязнения водных объектов расположенных на территории муниципальных образований в границах водосборного бассейна р. Уфа и графически интерпретированы на рисунке 5.6.

Таблица 5.5 - Результаты расчета риска истощения и загрязнения водных объектов муниципальных образований на территории водосборного бассейна р. Уфа

№	Название муниципального образования	УКИЗВ	К зап	Кз	Risk _{заг}	Risk _{сп}
	Пермский край					
1	Чернушинский район	2,48	10	1,0	0,9868	0,89
2	Октябрьский район	2,45	10	1,0	0,9860	0,88
	Челябинская область					
3	Ашинский район	2,10	10	1,0	0,9743	0,84
4	Катав-Ивановский район	2,60	10	1,0	0,9893	0,90
5	Саткинский район	3,40	10	1,0	0,9973	0,95
6	Нязепетровский район	3,60	10	1,0	0,9981	0,96
7	Кусинский район	4,40	10	1,5	0,9999	1,00
8	Златоустовский городской округ	4,55	10	1,5	0,9999	1,00
9	Верхнеуфалейский городской округ	3,77	10	1,0	0,9986	0,96
10	Карабашский городской округ	4,10	10	1,5	0,9999	1,00
11	Кыштымский городской округ	3,90	10	1,0	0,9988	0,97
12	Каслинский район	3,88	10	1,0	0,9988	0,97
13	Усть-Катавский ГО	2,13	10	1,0	0,9756	0,85
14	Трехгорный ГО	2,62	10	1,0	0,9896	0,97
	Башкортостан					
15	Уфимский район	3,28	10	1,0	0,9967	0,95
16	Бирский район	2,05	10	1,0	0,9719	0,98
17	Мишкинский район	1,43	10	1,0	0,9173	0,72

№	Название муниципального образования	УКИЗВ	К зап	Кз	Risk _{заг}	Risk _{ср}
18	Балтачевский район	1,38	10	1,0	0,9098	0,79
19	Благовещенский район	1,75	10	1,0	0,9527	0,78
20	городской округ Уфа	3,40	10	1,0	0,9973	1,00
21	Иглинский район	3,20	10	1,0	0,9962	0,94
22	Аскинский район	1,67	10	1,0	0,9456	0,77
23	Нуримановский район	1,42	10	1,0	0,9159	0,71
24	Караидельский район	0,99	10	0,5	0,5781	0,35
25	Салаватский район	1,83	10	1,0	0,9589	0,80
26	Белорецкий район	3,10	10	1,0	0,9955	0,93
27	Дуванский район	1,58	10	1,0	0,9364	0,75
28	Мечетлинский район	2,10	10	1,0	0,9743	0,84
29	Кигинский район	2,00	10	1,0	0,9694	0,83
30	Белокатайский район	2,80	10	1,0	0,9924	0,91
31	Учалинский район	3,30	10	1,0	0,9968	0,95
	Свердловская область					
32	Красноуфимский городской округ	3,60	10	1,0	0,9981	0,96
33	Ачитский городской округ	4,20	10	1,5	0,9999	1,00
34	Шалинский городской округ	4,16	10	1,5	0,9999	1,00
35	Артинский городской округ	3,75	10	1,0	0,9986	0,96
36	Нижнесергинский район	3,90	10	1,0	0,9989	0,97
37	Бисертский городской округ	4,05	10	1,5	0,9999	0,99
38	городской округ Первоуральск	4,10	10	1,5	0,9999	1,00
39	городской округ Ревда	3,80	10	1,0	0,9987	0,98
40	Полевской городской округ	3,81	10	1,0	0,9987	0,98

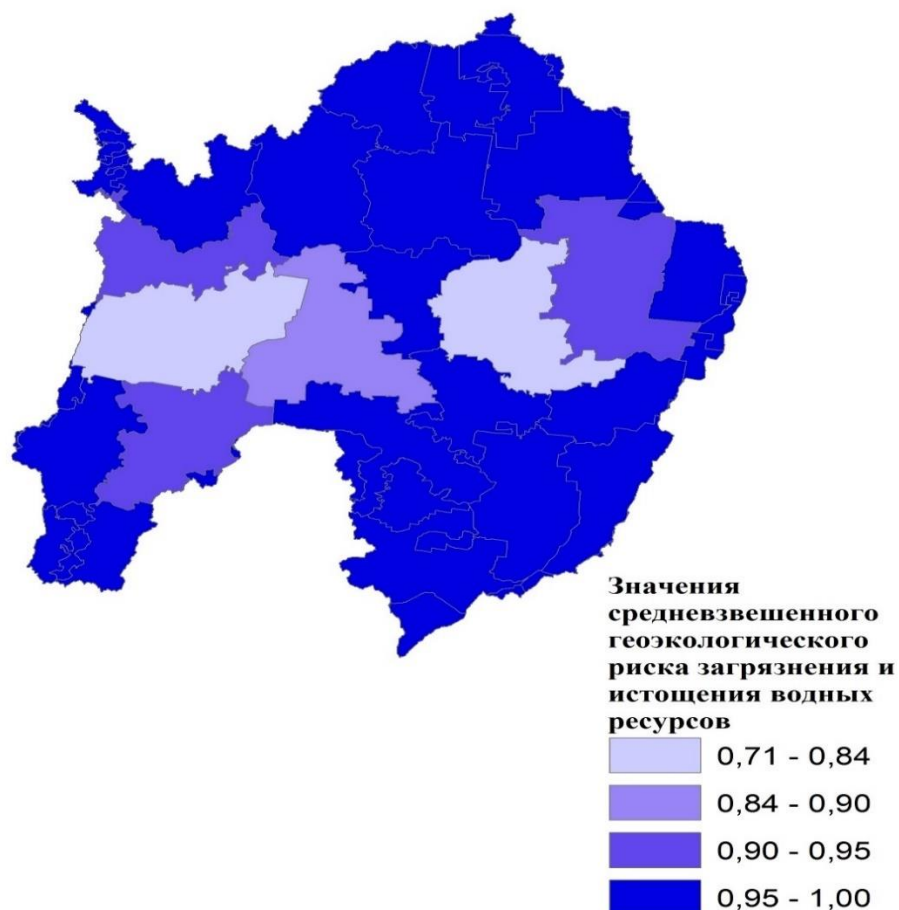


Рисунок 5.6 – Пространственное распределение средневзвешенного геоэкологического риска и загрязнения водных ресурсов муниципальных образований, расположенных на территории водосбора р. Уфы.

Величина средневзвешенного геоэкологического риска выделялась путем ранжирования значения средневзвешенного риска согласно данным табл. 5.2. По рисунку 5.6 видно, что большинство муниципальных образований водосборного бассейна относится к территориям с сильным и очень сильным риском истощения и загрязнения. В связи с этим, принятие управленческих решений водными ресурсами основывается на анализе рисков истощения, загрязнения и средневзвешенного геоэкологического риска.

5.6 Система поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами

Управленческие решения рекомендуется принимать исходя из значений средневзвешенного геоэкологического риска, а также рисков истощения, загрязнения. Основные этапы определения геоэкологического риска на водосборной территории и выбора решения по его минимизации представлены на рисунке 5.7.

1. Сбор исходных данных для муниципальных образований. В качестве исходных данных используются:

- данные о водопотреблении в каждом;
- расход воды в реках в пределах;
- сумма площадей водосборных бассейнов на территории;
- геологическое строение территории;
- УКИЗВ для водных объектов.

2. На втором этапе происходит расчет рисков загрязнения, истощения и средневзвешенного геоэкологического риска водных объектов на территории муниципальных образований.

3. На третьем этапе происходит анализ результатов расчета рисков. На основе совокупности полученных результатов формируются рекомендации.

4. Заключительный этап – рекомендации [208].

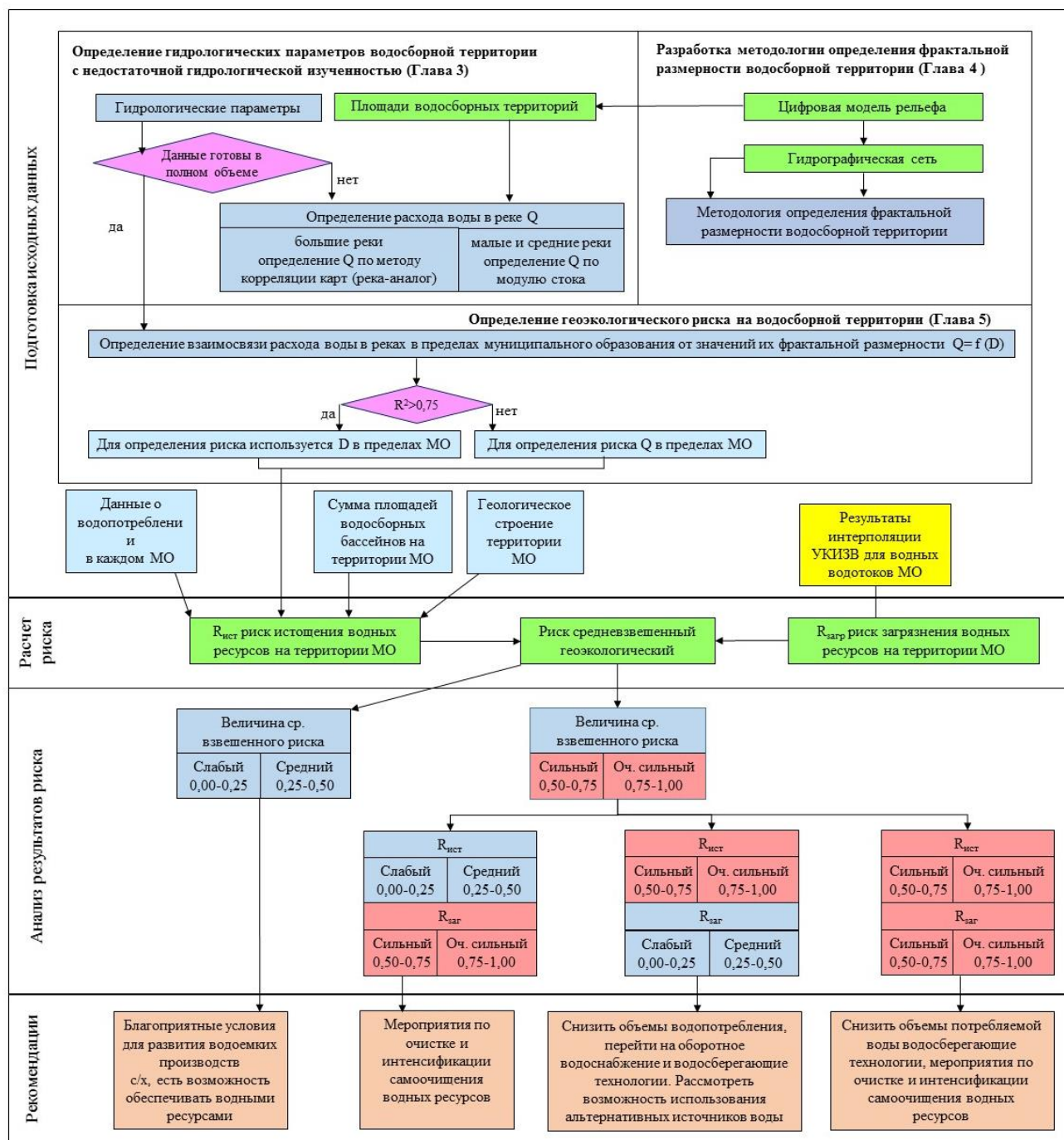


Рисунок 5.7 - Этапы принятия управленческих решений на основе анализа риска загрязнения и истощения водосборной территории

Как видно по рисунка 5.7 если средневзвешенный геоэкологический риск характеризуется как слабый или средний, то рассматриваемая территория муниципального образования может быть пригодна для применения водоёмких технологий и транспортировки водных ресурсов в соседние муниципалитеты.

Если средневзвешенный геоэкологический риск для одного из муниципальных образований характеризуется как сильный или очень сильный, то следует рассмотреть в отдельности риски истощения и загрязнения в данном муниципальном образовании. В случае, когда риск истощения слабый или средний, а уровень риска загрязнения определяется как сильный или очень сильный, то для данного муниципального образования необходимы мероприятия по очистке воды и интенсификации процессов самоочищения. В случае антибатного изменения рисков, когда риск истощения превышает риск загрязнения, рекомендуется снизить объемы водопотребления и перейти на водосберегающие технологии.

Если оба оцениваемых риска оцениваются как сильные или очень сильные – то рекомендуется снизить объемы водопотребления, применить водоочистные системы и мероприятия по интенсификации самоочищения, а также рассмотреть возможность использования альтернативных путей водоснабжения [208].

5.7 Разработка геоинформационной системы управления геоэкологическими рисками

Для эффективного управления хозяйственной и производственной деятельностью и оперативного обеспечения руководства полной и достоверной пространственной информацией разработана геоинформационная система управления геоэкологическим риском в виде совокупности технических, программных и информационных средств, обеспечивающих ввод, хранение, обработку и интегрированное представление пространственных и соотнесенных с ними атрибутивных данных для решения проблем планирования и управления [21].

В основе ГИС лежит методика по оценке риска геоэкологическим риском. Архитектура разрабатываемой ГИС представлена на рисунке 5.8.

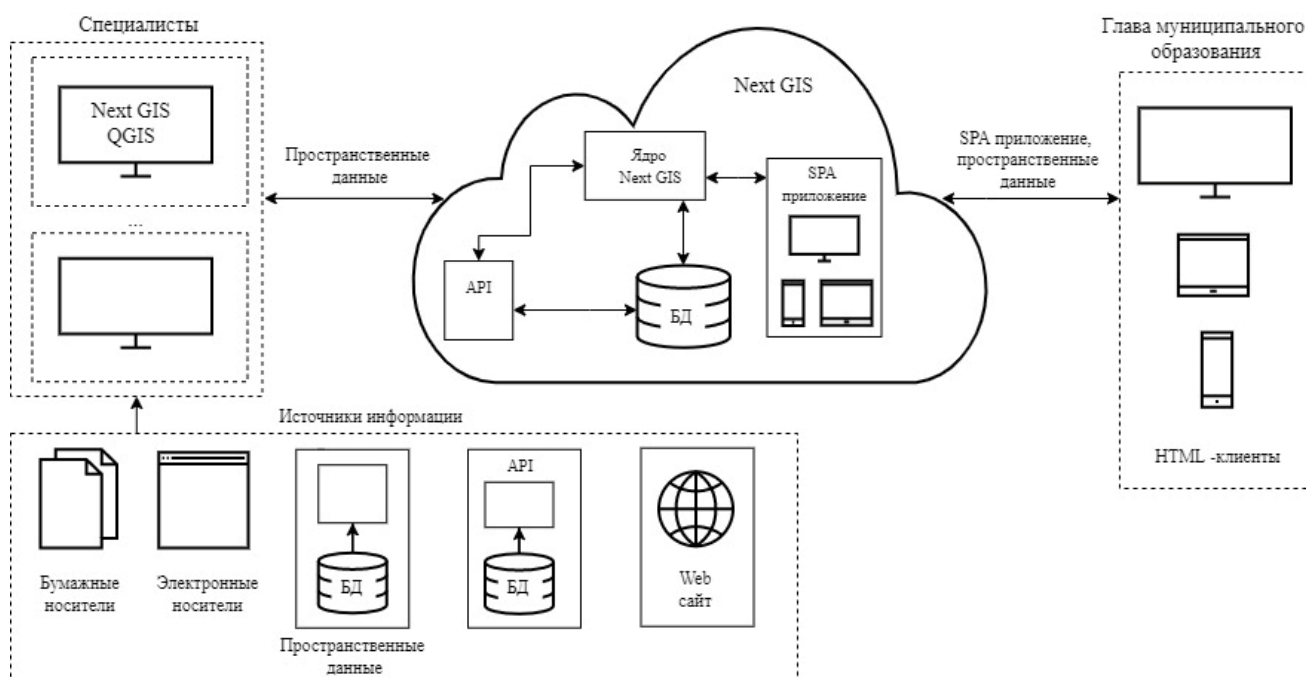


Рисунок 5.8 – Архитектура ГИС управления геоэкологическими рисками

Как видно из рисунка 5.8 специалист получает данные из различных источников, обрабатывает их с помощью NextGIS/QGIS, определяет значения геоэкологического риска в МО. Используя модуль NextGIS пространственные данные загружаются на облачный сервер. Главы МО через браузер заходят на сайт и получают информацию о величинах геоэкологического риска и о рекомендуемых мероприятиях для его минимизации.

Решаемые задачи:

1. Первым, наиболее распространенным классом задач являются информационно–справочные задачи. ГИС позволят осуществлять поиск и уточнение местоположения и характеристик интересующих объектов.

2. Второй тип – прогнозирование геоэкологического риска на территории МО, планирование мероприятий, связанных с управлением водными ресурсами. Решение этих задач позволит в удобной и наглядной картографической форме (на экране дисплея или на бумажном носителе) получать обобщенную или детализированную информацию [21].

Выполнение поставленных задач возможно благодаря взаимодействию следующих модулей разработанной ГИС: модуль сбора данных, модуль аналитики и модуль загрузки данных в облако. Схематично работа модулей ГИС представлена на рисунке 5.9.

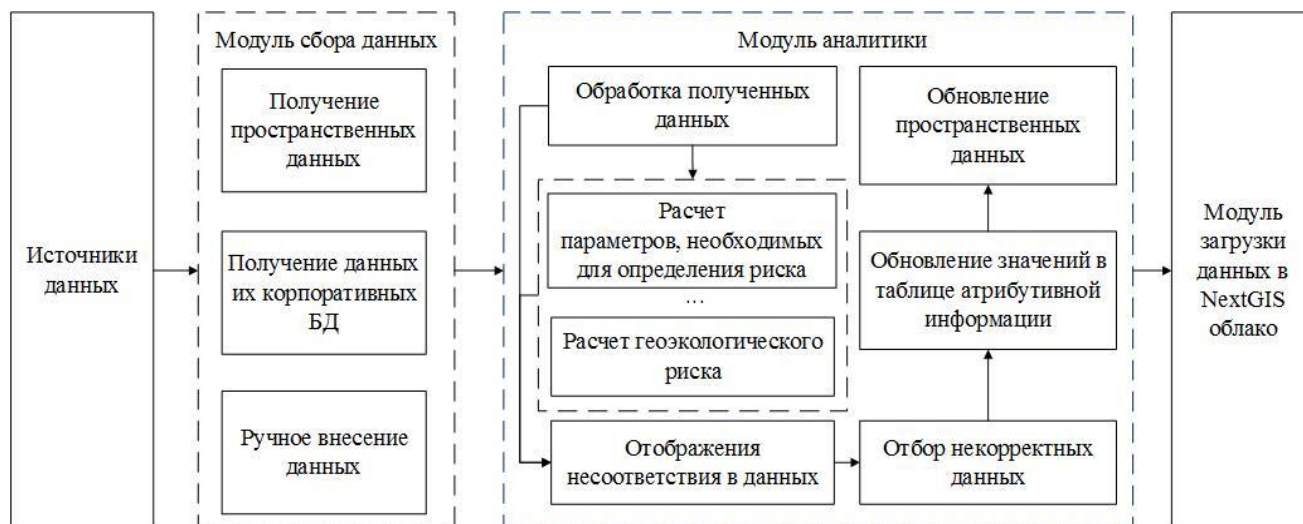


Рисунок 5.9 – Модули ГИС управления геоэкологическими рисками

Как видно по рисунку 5.9 на входе в систему подаются данные, которые собираются в модуле сбора и поступают в модуль аналитики, где происходит расчет параметров, необходимых для оценки риска и расчет значений самого риска, а также отображение некорректных данных, обновление атрибутивной и пространственной информации. Значения, полученные в модуле аналитики передаются в модуль загрузки данных в облако и отображаются в веб версии ГИС. Разработанная ГИС опубликована на бесплатном облачном веб-сервисе NextGIS и доступна по ссылке:

<https://wrmrb.nextgis.com/resource/31/display?panel=layers>

Интерфейс программы и представлен на рисунке 5.10.

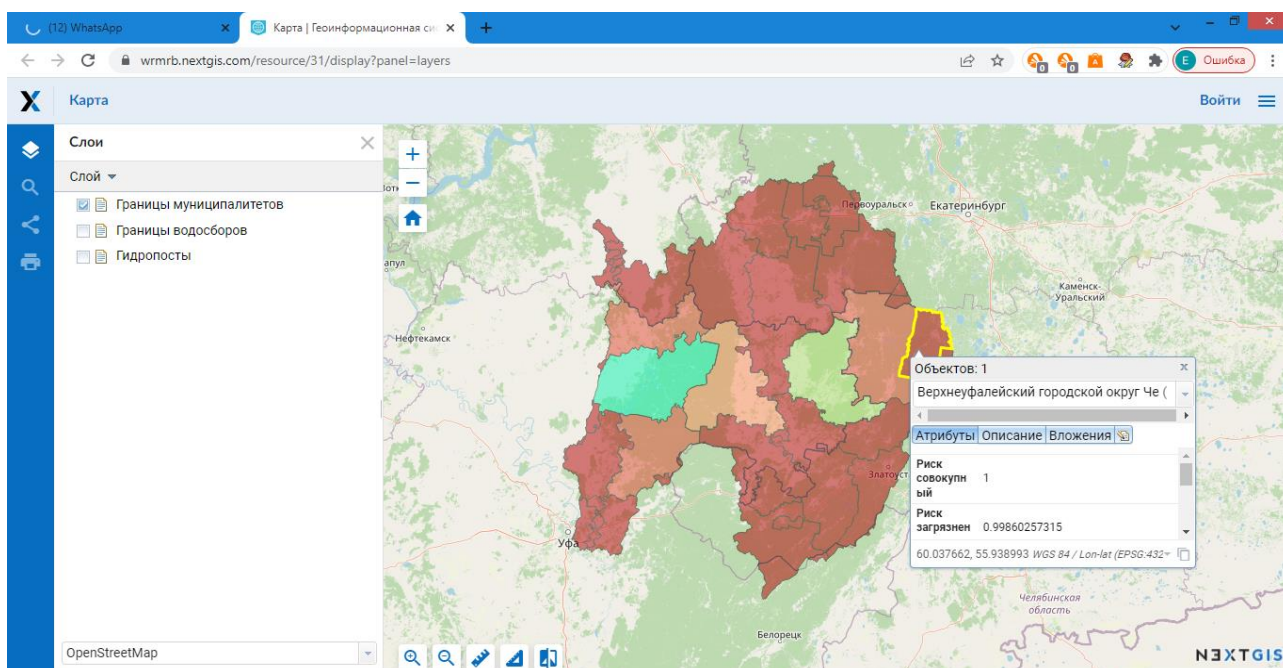


Рисунок 5.10 - Геоинформационная система поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами в муниципальных образованиях

Настоящая геоинформационная система находится в открытом доступе, предназначена в первую очередь для руководителей муниципальных образований, а также управлений и ведомств, осуществляющих контрольную и надзорную функцию в области управления водными ресурсами.

Разработанная ГИС может быть применима к любому уровню административно-территориального деления (район, субъект, федеральные округ и др.), отвечает требованию постоянного обновления и дополнения входных данных.

Результаты и выводы по главе 5

1. Изложена методика определения геоэкологического риска истощения и загрязнения водных ресурсов адаптирована для 40 муниципальных образований, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфа. Приведены результаты расчета геоэкологического риска поверхностных водных ресурсов для каждого района расположенного на территории водосборного бассейна р. Уфа. Минимальный риск отмечается в Караидельском районе (РБ) – 0,35, максимальный – 0,99 сразу для 8 районов Челябинской и Свердловской областей.

2. Разработана геоинформационная система для поддержки принятия решений по управлению водными ресурсами в условиях административно-территориального деления, основанная на обработке разнородных пространственных данных с применением фрактальной размерности гидрографической сети. ГИС позволяет наглядно представлять информацию и зонировать территорию по значениям риска.

3. Разработан комплекс рекомендации для муниципальных образований по снижению рисков загрязнения и истощения водных ресурсов. Настоящая система поддержки принятия решений может быть применима к любому уровню административно-территориального деления (район, субъект, федеральные округ и др.).

Выводы

1. Разработаны базы данных характеристик исследуемой водосборной территории:

Гидрохимические показатели р. Белая и ее притоков

Основные характеристики поймы р. Белая и ее основных притоков.

2. Раскрыты особенности прогнозирования расходов воды в реках на территории с недостаточной гидрологической изученностью. Изложена методика геомоделирования расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью. Установлено, что для больших и средних рек наиболее достоверные результаты получаются с использованием метода корреляции карт (погрешность не превышает 16 %). Для малых рек - значения среднегодовых расходов воды по карте модуля стока (погрешность менее 16%). Согласно разработанной методике предлагается объединить 2 способа определения расхода воды: для больших и средних рек использовать метод корреляции карт, для малых – определять расход по карте модуля стока.

3. Разработана научно обоснованная методология расчета фрактальной размерности гидрографической сети методом box - counting. Раскрыто отсутствие единого подхода для расчета фрактальной размерности. Изложены факторы, оказывавшие влияние на результат расчета фрактальной размерности природных объектов. Для расчета фрактальной размерности предложено использовать растровое изображение водосборов разрешением 100 dpi. Максимальным и достаточным масштабом исследуемого водосбора является 1:200000. При расчёте географическая ориентация изображения водосбора сохраняется. ПК должен соответствовать системным требованиям для MATLAB R2020b. Минимизация субъективного фактора достигается применением программы АРФР, обладающей следующими преимуществами: автоматическая обработка и минимизация субъективного фактора при определении фрактальной размерности, возможность работы с изображениями в формате jpg, отсутствие

влияния цветового диапазона исследуемого изображения на результаты расчета, снижение трудозатрат при расчете.

Установлены зависимости между фрактальной размерностью гидрографической сети и: количеством малых рек на водосборной территории, значением коэффициента наводнений и расходами воды в реках. Доказана перспективность использования фрактальной размерности гидрографической сети в качестве дополнительного источника информации при определении состояния водосборной территории.

4. Разработана геоинформационная система для определения геоэкологического риска на водосборной территории, основанная на обработке разнородных пространственных данных. Апробация ГИС проведена на муниципальных образованиях, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфа.

Список литературы

1. Деревяго И.П. Экономические инструменты управления водными ресурсами, объектами и водохозяйственными системами в Республике Беларусь: тематические материалы проекта «Водная инициатива ЕС плюс для Восточного партнерства» / И.П. Деревяго, С.А. Дубенок. – Минск: БГТУ, 2019. – 304 с.
2. Красногорская Н. Н. Геоэкологическая оценка и прогнозирование опасных природно-техногенных процессов на водосборе реки / Н. Н. Красногорская, Э. В. Нафикова. – Уфа, 2015. – 242 с.
3. Kebo S. Canadian ENGOs in governance of water resources: information needs and monitoring practices / S. Kebo, M.J. Bunch // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2013. – Vol. 185. – № 11. – P. 9451 - 9460.
4. Hunt V.M. A data management system for long-term natural resource monitoring and management projects with multiple cooperators / V.M. Hunt, S.K. Jakobi, M.G. Knutson, E.V. Lonsdorf, S. Papon, J. Zorn // *Wildlife Society Bulletin*. – 2015. – Vol. 39. – № 3. – P. 464 – 471.
5. Колбанёв М.О. Вызовы цифровой экономики/ М.О. Колбанёв, И.И. Палкин, Т.М. Татарникова // *Ученые записки РГГМУ*. – 2020. – № 58. – С. 156 - 167. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-156-167
6. Strager M.P. Watershed analysis with GIS: the watershed characterization and modeling system software application / M.P. Strager, J.J. Fletcher, J.M. Strager et al. // *Computers & Geosciences*. – 2010. – Vol. 36. – Issue 7. – P. 970-976. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.01.003>
7. Hewett C.J. Hydroinformatics framework to aid decision-making for catchment management / C.J. Hewett, M.A. Doyle, P.F. Quinn // *Journal of Hydroinformatics*. – 2010. – Vol. 12. – № 2. – P. 119 - 139. doi: 10.2166/hydro.2009.022
8. Rong Y. Practical environmental statistics and data analysis / Y. Rong // *ILM publications*. – 2011. – 269 p.

9. Rohmat F.I.W. Enabling improved water and environmental management in an irrigated river basin using multi-agent optimization of reservoir operations/ F.I.W. Rohmat, T.K. Gates, J.W. Labadie // Environmental modelling and software. – 2021. – Vol. 135. – P. 1 - 13. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104909

10. Cyr-Gagnon J. Optimizing data management for municipal source water protection / J. Cyr-Gagnon, M. J. Rodriguez // Land use policy. – 2021. – Vol. 100. 103788. – P. 1 - 12. doi:10.1016/j.landusepol.2018.12.035

11. Nayan N. K. Spatio-temporal dynamics of water resources of Hyderabad Metropolitan Area and its relationship with urbanization / N. K. Nayan, A. Das, A. Mukerji, T. Mazumder, S. Bera // Land Use Policy. – 2020. – Vol. 99. 105010. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105010>

12. Isnain Z. Using the geographical information system (GIS) and remote sensing techniques for mapping the groundwater potential zones in Kg Timbang Dayang, Kota Belud, Sabah / Z. Isnain, S. N. A. Ghaffar // Water Conservation And Management. – 2020. – Vol. 4. – № 1. – P. 57 - 60. doi:10.26480/wcm.01.2020.57.60

13. Abbas M.R. Variations size investigation in vegetation and surface waterbody for Central Part of Iraq using satellite imagery bands / M.R. Abbas, M. M. Hason, B. B. Ahmad, A.W.B. Rasib, T.R. Abbas // 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 928. – P 1-12. doi: 10.1088/1757-899X/928/2/022064

14. Ротанова И. Н. Геоинформационные методы и системы в управлении регионом (на материалах проектов конкурса "РФФИ - СИБИРЬ"(Алтайский край)) / И. Н. Ротанова // Вестник российского фонда фундаментальных исследований. – 2018. – № 4.(100). – С. 62-66. doi: 10.22204/2410-4639-2018-100-04-62-66

15. Yousaf W. A paradigm of GIS and remote sensing for crop water deficit assessment in near real time to improve irrigation distribution plan / W. Yousaf, W. K. Awan, M. Kamran et al. // Agricultural Water Management. – 2021. – Vol 234. 106443. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106443>

16. Mallik S. Groundwater suitability analysis for drinking using GIS based fuzzy logic / S. Mallik, U. Mishra, N. Paul // Ecological indicators. – 2021. – Vol. 121. – P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107179>

17. Li N. Early warning expert decision system of water resource management based on Cloud Computing / N. Li // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1648. – P. 1-5. doi: 10.1088/1742-6596/1648/4/042096

18. Щербинина С. В. Эколого-гидрологическая оценка состояния речных водосборов для уточнения комплекса водоохраных мероприятий (на примере Воронежской области): специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук/ Щербинина Светлана Васильевна; Воронежский государственный педагогический университет. – Воронеж, 2006. – 154 с.

19. Nafikova E. Assessment of geoeological conditions and the depletion risk of the river Belaya catchment area. / E. Nafikova et al. // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 157. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702003>

20. Павлов С. В. Структура разнородной территориально-распределенной пространственной информации при создании единой геоинформационной системы Росводресурсов / С. В. Павлов, Р. З. Хамитов, А. Б. Никитин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 4. – С. 3-10.

21. ФГБОУ ВО УГАТУ: официальный сайт. – Уфа. – Обновляется в течение суток. – URL: http://www.gis.ugatu.ac.ru/newSG/project_5.html (дата доступа 15.03.2022).

22. Федерального агентства водных ресурсов: официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://gis.favr.ru/single-map> (дата доступа 15.03.2022).

23. Христодуло О.И. Разработка комплексной автоматизированной системы поддержки принятия решений по управлению природными ресурсами и охране окружающей среды РБ / О.И. Христодуло // Геоинформационные

технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. – Уфа. – 2011. – С. 146-155.

24. Христодуло О. И. Интеграция и генерализация разнородной территориально распределенной пространственной информации на основе многомерных моделей данных для задач, связанных с управлением природными ресурсами / О. И. Христодуло // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15. – № 2 (42). – С. 39-44.

25. Павлов С.В., Использование геоинформационных технологий при разработке подсистемы информационного обеспечения контроля развития паводковой ситуации на территории Республики Башкортостан. / С.В. Павлов, С.Р. Галямов, И.Н. Зайтов, О.И. Христодуло // ArcReview. – 2006– №4(39).– С. 5.

26. Портал государственного комитета по Республики Башкортостан по ЧС. Паводок 2.0: официальный сайт. – Уфа. – Обновляется в течение суток. – URL <https://portal.introgis.com/CoGIS/FloodRB> (дата обращения 15.03.2022).

27. Павлов С.В. Информационная система мониторинга паводковой ситуации с использованием ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования / С.В. Павлов, Ю.Н. Кунаков, О.И. Христодуло, А.Ф. Атнабаев, К.Р. Хамитов // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. – Уфа. – 2009. – С. 121-133.

28. Айзель Г.В. Расчеты речного стока на основе модели SWAP для водосборов с недостаточным информационным обеспечением: специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Айзель Георгий Владимирович ; Институт водных проблем российской академии наук. – Москва, 2014. – 156.

29. Archfield S.A. Map-correlation method: selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungaged catchments/ S.A. Archfield, R.M. Vogel // Water Resources Research. – 2010. – Vol. 46. – No. 10. – P. W10513.

30. Beven K. J. Rainfall-Runoff Modelling: / K. J. Beven. – The Primer 2d edition Wiley-Blackwell, 2012. – 488 p.

31. Seibert J. Gauging the ungauged basin: How many discharge measurements are needed? / J. Seibert, K. J. Beven // Hydrology and Earth System Sciences. – 2009. – Vol. 13(6) . – P. 883–892.

32. Sivapalan, M. Prediction in ungauged basins: A grand challenge for theoretical hydrology / M. Sivapalan // Hydrological Processes. – 2003. – Vol.17(15). – P. 3163 -3170.

33. Blöschl G. Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales / G. Blöschl, M. Sivapalan, T. Wagener, A. Viglione, H. Savenije. – Cambridge university press Hardback 1st edition, 2013. – 484 p. ISBN 978-1-107-02818-0

34. Hundedcha Y. Regional estimation of parameters of a rainfall-runoff model at ungauged watersheds using the “spatial” structures of the parameters within a canonical physiographic-climatic space / Y. Hundedcha, T. B. Ouara, A. Bárdossy // Water Resources Research. – 2008. – T. 44. – № 1. – P. W01427

35. Hrachowitz M. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review / Hrachowitz M., Savenije H.H.G., Blöschl G. et al. // Hydrological Sciences Journal. – 2013. – № 58(6). – C. 1198-1255.

36. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. ГГИ Росгидромета. – СПб.: Нестор- История, 2009. – 193 с.

37. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. ГГИ Росгидромета. – СПб.: Нестор- История, 2004. – 67 с.

38. Bobrovitskaya N.N. Development of a hydrological network of observation in conditions of global warming (an example of Yakutia, Eastern Siberiya) / N.N. Bobrovitskaya, A.A. Kokorev.— Proceedings of 12-th Riversymposium, Brisbane, Australia, 2009. – C. 27.

39. Обзор деятельности Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2013. – 53 с.

40. ГОСТ 17.1.3.07-82. Межгосударственный стандарт Охрана природы. Гидросфера Правила контроля качества воды водоемов и водотоков = Nature protection. Hydrosphere. Procedures for quality control of water in reservoirs and stream flows: национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Минприроды России от 16 апреля 1992 г. № 60 снято ограничение срока действия. – 10 с.

41. Р 52.24.309-2004 Рекомендации Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши на сети Росгидромета: зарегистрирован Государственным учреждением "Центральное конструкторское бюро гидрометеорологического приборостроения" (ГУ ЦКБ ГМП) 15.12.2004: утвержден первым заместителем Руководителя Росгидромета 28.10.2004: Дата введения 01.01.2006 . – 137 с.

42. Ивченко Л. В. Повышение эффективности работы очистных сооружений с учетом самоочищающей способности рек: специальность **05.23.04** «Водоснабжение, канализация, строительные системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Ивченко Лариса Владимировна; Брянская государственная сельскохозяйственная академия. – Брянск, 2005. – 241 с.

43. Blöschl G. Scale issues in hydrological modelling: a review / G. Blöschl, M. Sivapalan //Hydrological processes. – 1995. – Т. 9. – № 34. – С. 251-290.

44. Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза / К. П. Воскресенский – Л., 1962. – 552 с.

45. Arcgis.: официальный сайт – Обновляется в течение суток. – URL.: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/> (дата доступа 25.05.2023)

46. Krige D.G. A Statistical Approach to Some Mine Valuation and Allied Problems on the Witwatersrand / D.G. Krige // Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. – 1951. – Т. 52. – № 6. – С.119-139.

47. Носонов А. М. Методы географического прогнозирования / А. М. Носонов // Псковский регионологический журнал. – 2013. – № 15 – С. 3-14.

48. Oudin L. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments / L. Oudin, V. Andréassian, C. Perrin et al.// Water Resources Research. – 2008. – Т. 44. – № 3. – P.W03413

49. Razavi T. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods / T. Razavi, P. Coulibaly, M. Asce // Journal of hydrologic engineering. – 2012. – Т. 18. – № 8. – С. 958-975.

50. Красногорская Н.Н. Обзор методов прогнозирования на водосборах, неохваченных наблюдениям / Н.Н. Красногорская, Э.В. Нафикова, Е.А. Белозёрова, О.В. Соколова // Международный научный журнал «Символ науки». – 2016. – № 12-3 – С. 267 – 271.

51. Чупикова С.А. Фрактальные методы выявления скрытой регулярности в эрозионном расчленении поверхности: специальность 25.00.25 «Геоморфология и эволюционная география»: диссертация на соискание учёной степени кандидата географических наук/ Чупикова Светлана Алексеевна; Российская академия наук Сибирское Отделение Учреждение РАН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов, Учреждение РАН Институт мониторинга климатических и экологических систем – Томск, 2010. – 134 с.

52. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

53. Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей / А.Ю. Сидорчук // Геоморфология. – 2014. – № 1 – С. 3-14.

54. Орлов В.Г. Основы физической гидрологии: учебное пособие / В.Г. Орлов. – Ленинград, 1979. – 72 с.
55. Чупикова С.А. Морфометрический и фрактальный анализ водосборного бассейна реки Харал / С.А. Чупикова, И.К. Андронаке // Природные ресурсы, среда и общество. – 2019. – № 2(2). – С. 54–60. doi: 10.24411/2658-4441-2019-0003.
56. Чупикова С.А. Фрактальный анализ бассейна реки Великий Енисей (Улуг-Хем, Тува) / С.А. Чупикова // Процессы самоорганизации в эрозионно-русловых системах и динамике речных долин: Всерос. науч. конф. . – Томск, 2012. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://pandia.ru/text/77/336/64686.php> (дата обращения: 25.02.2023).
57. Мельник М.А. Фрактальный анализ извилистости рек (на примере Томской области) / М.А. Мельник // Вестник Томского государственного университета – 2009. – № 335. – С. 168-176
58. Балханов В. К. Фрактальная размерность дельты реки Лены и тундровых озер Якутии / В. К. Балханов, О. Ф. Лухнева, Ю. С. Куснер, Ю. Б. Башкуев // География и природные ресурсы – 2008. – № 2. – С 153-157
59. Балханов В. К., Башкуев Ю. Б. Фрактальные разветвленные структуры. Дельта реки Селенга / В. К. Балханов, Ю. Б. Башкуев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 4. – С. 20-23
60. Лухнева О. Ф. Дельты рек Волги, Селенги и Лены как природные фрактальные объекты. XXII / О. Ф. Лухнева, В. К. Балханов // Всероссийская молодежная конференция (Иркутск. Россия). – 24-29 апреля 2007. – Иркутск, 2007 – С. 43-44.
61. Лухнева О. Ф. Временная динамика фрактальной размерности дельты р. Селенги / О. Ф. Лухнева // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5. – № 10/11. – С. 712-715.
62. Алексеевский Н.И. Фрактальные свойства речных систем и их использование в гидрологических расчетах/ Н.И. Алексеевский, А.Г. Косицкий,

А.В. Христофоров // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 371. – С. 167–170.

63. Cieplak M. Models of Fractal River Basins / M. Cieplak, A. Giacometti, A. Maritan, A. et al. // Journal of Statistical Physics. – 1998. – Vol. 91. – P. 1-15.

64. Moussa R., Bocquillon C. Morphologie fractale du réseau hydrographique. //Hydrological Sciences Journal. – 1993. – 38:3. – P. 187-201.

65. Khanbabaei Z. Studying relationships between the fractal dimension of the drainage basins and some of their geomorphological Characteristics / Z. Khanbabaei, A. Karam, G. Rostamizad // International Journal of Geosciences. – 2013. – № 4. – P. 636-642.

66. Tarboton D. G. Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity / D. G. Tarboton // Journal of Hydrology. – 1996. – Vol. 187. – P.105-117.

67. Claps P. Reexamining the determination of the fractal dimension of river networks / P. Claps, G. Oliveto // Water Resources Research. – 1996. – Vol. 32. – № 10. – P. 3123-3135.

68. Иванов А.В. Определение фрактальной размерности овражно-балочной сети города Саратова / А.В. Иванов, А.А. Короновский, И.М. Минюхин, И.А. Яшков // Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика». – 2006. – Т. 14. – № 2. – С. 64-74.

69. Krasnogorskaya N. Fractal analysis application to the floodplain-channel systems development research (by the example of the river Belaya, the Republic of Bashkortostan) / N. Krasnogorskaya, E. Nafikova, E. Belozerova // XIV International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Managment, SGEM 2014 . (Bulgaria). – June 17-26, 2014. – Vol. 1. – P. 613-620.

70. Andronache, I. Influenta factorilor antropici asupra Baltii Brailei (Insula Mare a Brailei) in perioada 1964 –2000 / I. Andronache, V. Lepadatu // Sesiunea nationala cu participare internationala de comunicări tehnico-stiitifice. – Braila, 22 – 24 iunie 2001. – Bucuresti: AGIR, 2001.

71. Цветков И.В. Фрактальный анализ в математическом моделировании региональных водных систем: 05.13.16 «Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях»: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук/ Цветков Илья Викторович, Тверской государственный университет. – Тверь, 1999. – 117 с.

72. Sivakumar B. Fractal analysis of rainfall observed in two different climatic regions / B. Sivakumar // Hydrological Sciences Journal. – 2000. – Vol. 45(5). – P. 727-738.

73. Voss K.F. Fractals in nature: from characterization to simulation. / K.F. Voss // The science of fractal images. – 1988. – Springer, New York, P. 21-70. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-3784-6_1

74. Klinkenberg B. A. Review of Methods Used to Determine the Fractal Dimension of Linear Features / B. A. Klinkenberg // Mathematical Geology. – 1994. – Vol. 26. – No. 1. – P. 23-45.

75. Lindi J. Quackenbush Calculating fractal dimension using the triangular prism / J. Lindi // METHOD ASPRS 2005 Annual Conference “Geospatial Goes Global: From Your Neighborhood to the Whole Planet” March 7-11, 2005 Baltimore, Maryland, 2005. – P. 1-15.

76. Bruno, B. Lava flows are Fractals / B. Bruno, G. Taylor, S. Rowland, P. Lucey, and S. Self // Geophysical Research Letters. – 1992. – Vol. 19. – P. 305-308.

77. Culling W. E. H. The Fractal Geometry of the Soil-Covered Landscape / W. E. H. Culling, M. Datko //: Earth Surface Processes and Landforms. – 1987. – Vol. 12. – P. 369-385. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120404>

78. Goodchild M. F. The Fractional Brownian Process as a Terrain Simulation Model / M. F. Goodchild // Modelling Simulation. – 1982. – Vol. 3. – P. 1133-1137.

79. Kent C. An index of littoral zone complexity and its measurement / C. Kent, J. Wong // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. – 1982. – Vol. 39. – P. 847-853.

80. Lavery M. Fractals in karst / M. Lavery // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 1987. – Vol. 12. – P. 475-480.
81. Breyer S.P. Drainage basin perimeters: a fractal significance / S.P. Breyer, R.S. Snow // *Geomorphology*. – 1992. – Vol. 5. – P. 143-157.
82. Fitter. A.H. Fractal characterization of root system architecture / A.H. Fitter., T.K. Strickland // *Functional Ecology*. – 1992. – Vol. 6. – P. 632-635.
83. Pennycuik C.J. Units of measurement for fractal extent. applied to the coastal distribution of bald eagle nests in the Aleutian islands, Alaska / C.J. Pennycuik, N.C. Kline // *Oecologia*. – 1986 – Vol. 68. – No. 2. – P. 254-258.
84. Vlcek J. Fractal analysis of leaf shapes / J. Vlcek., E. Cheung // *Canadian journal of forest research*. – 1986. – Vol. 16. – P. 124-127.
85. Bradbury R.H. Fractal dimension of a coral reef at ecological scales / R.H. Bradbury, R.E. Reichelt // *Marine ecology Progress series*. – 1983. – Vol. 10. P.169-171.
86. Bradbury R.H. Fractals in ecology: methods and Interpretation / R.H. Bradbury, R. Reichelt, D.G. Green // *Marine ecology Progress series*. – 1984. – Vol. 14 (2-3). – P. 295-296.
87. Morse, D. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths/ D. Morse, J. Lowton, M. Dodson, M. Williamson // *Nature*. – 1985. – Vol. 314. – P. 731-733.
88. Tunas G. Fractal Characteristic Analysis of Watershed as Variable of Synthetic Unit Hydrograph Model / G. Tunas , N. Anwar, U. Lasminto // *The open civil engineering journal*. – 2016. – Vol. 10. – P. 706-718.
89. Vignes-Adler M. Fractal analysis of fracturing in two African regions, from satellite imagery to ground scale / M. Vignes-Adler, A. Le Page, P.M. Adler // *Tectonophysics*. – 1991. – Vol. 196. – P. 69-86.
90. Gunnarsson B. Fractal dimension of plants and body size distribution in spiders / B. Gunnarsson // *Functional Ecology*. – 1992. – Vol. 6. – P. 636-641.

91. Jeffries M.J. Invertebrate colonization of artificial pondweeds of differing fractal dimension / M.J. Jeffries // *Oikos*. – 1993. – Vol. 67. – P. 142 - 148.
92. Shorrocks B. The fractal dimension of lichens and the distribution of arthropod body lengths / B. Shorrocks, J. Marsters, I. Ward, P.J. Evennett // *Functional Ecology*. – 1991. – Vol. 5. – P. 457-460.
93. Tatsumi J. Fractal analysis of plant root systems/ J. Tatsumi, A. Yamauchi, Y. Kono // *Annals of Botany*. – 1989. – Vol. 64. – P. 499-503.
94. Virkkala K. Ranges of northern forest passerines: a fractal analysis / K. Virkkala // *Oikos*. – 1993. – Vol. 67. – P.218-226.
95. Wiens J.A. Scaling of 'landscapes' in landscape ecology, or landscape ecology from a beetle's perspective / J.A. Wiens, B.T. Milne // *Landscape Ecology*. – 1989. – Vol. 3. – P. 87-96.
96. Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas / S. Lovejoy // *Science*. – 1982. – Vol. 216. – P. 85-187.
97. Woronow A. Morphometric Consistency with the Hausdorff-Besicovitch dimension / A.Woronow // *Mathematical Geology* – 1981. – Vol. 13. – P. 201-216.
98. Reams M.W. Fractal Dimensions of sinkholes / M.W. Reams // *Geomorphology*. – 1992. – Vol. 5. – P. 159-165.
99. Krummel J.R. Landscape patterns in a disturbed environment/ J.R. Krummel, R.H. Gardner, G. Sugihara, R.V. O'Neill, P.R. Coleman // *Oikos*. 1987. – Vol. 48. – P. 321–324.
100. O'Neill R.V. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*/ R.V. O'Neill, J.K. Krummel, R.H. Gardner et al.// *Landscape Ecology*. – 1988. – Vol. 1. –P. 153-162.
101. Turner M.G. Changes in landscape patterns in Georgia, USA / M.G. Turner, C.L. Ruscher // *Landscape Ecology*. – 1988. – Vol. 1. –P. 241-251.
102. Brown S. R. Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces / S. R. Brown, C. H. Scholz // *Journal of Geophysical Research*. – 1985. – Vol. 90. – P. 12575-12582.

103. Fox C. Quantitative methods for analyzing the roughness of the seafloor / C. Fox, D. E. Hayes // *Review of Geophysics*. – 1985. – Vol. 23. – P. 1-48.
104. Power W. Roughness of natural fault surfaces / W. Power, T. Tullis, S. Brown, G. Boitnott, C. Scholz // *Geophysical Research Letters*. – 1987. – Vol. 14. – P. 29-32.
105. Scholz C. H. The fractal geometry of faults and faulting / C. H. Scholz, C. A. Aviles // *Earthquake Source Mechanics*. – 1986. – Vol. 37. – P. 147-155.
106. Burrough P. A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data / P. A. Burrough // *Nature*. – 1981. – Vol. 294. – P. 240-242.
107. Burrough P. A. The application of fractal ideas to geophysical phenomena / P. A. Burrough // *Bulletin - Institute of Mathematics and Its Applications*. – 1984. – Vol. 20. – P. 36 – 42.
108. Culling W. E. H. Highly Erratic Spatial Variability of Soil-pH on Iping Common, West Sussex / W. E. H. Culling // *Catena*. – 1986. – Vol. 13. – P. 81-89.
109. Klinkenberg B. The fractal properties of topography: a comparison of methods / B. Klinkenberg, M. F. Goodchild // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 1992. – Vol. 17. – P. 217-234.
110. Rees W. Measurement of the fractal dimension of icesheet surfaces using Landsat data / W. Rees // *International Journal of Remote Sensing*. – 1992. – Vol. 13. – P. 663-671.
111. Milne B.T. Measuring the fractal geometry of landscapes / B.T. Milne // *Applied Mathematics and Computation*. – 1988. – Vol. 27. – P. 67-79.
112. Milne B.T. Lessons from applying fractal models to landscape patterns / B.T. Milne / B.T. Milne. – In *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. Edited by M.G. Turner and R.H. Gardner. Springer-Verlag, New York, 1991. – P. 199-235.
113. Milne B.T. Spatial aggregation and neutral models in fractal landscapes / B.T. Milne // *The American Naturalist*. – 1992. – Vol. 139. – P. 32-57.
114. Burlando. B. The fractal dimension of taxonomic systems / B. Burlando. // *Journal of Theoretical Biology*. – 1990. – Vol.146. – P. 99-114.

115. Hastings H.M. Time scales, persistence and patchiness / H.M. Hastings, R. Pielou, R. Monticciolo, D.Vun Kannon, Del Monte D. // *Biosystems*. –1982. – Vol. 15. – P. 281-289.
116. Hegde S.G. Seed size: distribution in plants: an explanation based on fractal geometry. / S.G. Hegde, R. Lokesh, K.N. Ganeshaiah // *Oikos*. – 1991. – Vol. 62. –P. 100-101.
117. Meltzer M.I. The use of fractals to assess the ecological impact of increased cattle population: case study from the Runde Communal Land, Zimbabwe / M.I. Meltzer, H.M. Hastings // *Journal of Applied Ecology*. – 1992. –Vol. 29. – P. 635 - 646.
118. Tyler. S.W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation / S.W. Tyler., S.W. Wheatcraft // *Soil Science Society America Journal*. – 1989. – Vol. 53. – P. 987-996.
119. Burrough P.A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I.The application of fractal concepts to nested levels of soil variation / P.A. Burrough // *European Journal of Soil Science*. – 1983. – Vol. 34. – P.577-597.
120. Palmer M.W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities / M.W. Palmer // *Vegetatio*. – 1988. – Vol. 75. – P. 91 - 102.
121. Phillips J.D. Measuring complexity of environmental gradients / J.D. Phillips // *Vegetatio*. – 1985. – Vol. 64. – P. 95-102.
122. King R.B. Fractal descriptions for spatial statistics / R.B. King, L.J. Weissman, J.B. Bassingthwaite // *Annals of Biomedical Engineering* – 1990. –Vol. 18. – P. 111- 122.
123. Ogata Y. Maximum likelihood estimates of the fractal dimension for random spatial patterns / Y. Ogata, K. Katsura // *Biometrika*. – 1991. –Vol. 78. – P. 463-474.
124. Bian L. Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana / L. Bian, S.J. Walsh // *The Professional Geographer*. – 1993. – Vol. 45. – P. 1-11.

125. Huang J. Fractal mapping of digitized images: application to the topography of Arizona and comparisons with synthetic images / J. Huang, D.L. Turcotte // *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. – 1989. – Vol. 94. – P.7491-7495.

126. Polidori L. Description of terrain as a fractal surface, and application to digital elevation model quality assessment / L. Polidori, J.J. Chorowicz, R. Guillande // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 1991. – Vol. 57. – P.1329-1332.

127. Brown S. A. A note on the description of surface roughness using fractal dimension / S. A. Brown // *Geophysical Research Letters*. – 1987. – Vol. 14. – P. 1095-1098.

128. Dubuc B. Evaluating the fractal dimension of profiles / B. Dubuc, J. Quiniou, C. Roques-Carmes et al.//: *Physical Review A*. – 1989. – Vol. 39. – P. 1500-1512.

129. Andre R. Estimating fractal dimension with the divider method in geomorphology / R. Andre // *Geomorphology*. – 1992. – Vol. 5. –P. 131-141.

130. Gierhart J. W. Evaluation of methods of area measurement / J. W. Gierhart // *Surveying Mapping*. – 1954. – Vol. 14. – P. 460 – 465.

131. Maling D. H. How Long is a Piece of String? / D. H. Maling // *The Cartographic Journal*. – 1968. – Vol. 5. – P. 147-156.

132. Longley P.A. On the Fractal measurement of geographical boundaries / P.A. Longley, M. Batty // *Geographical Analysis*. – 1989. – Vol. 21. – P. 47-67.

133. Peitgen H. O. Fractalsfor the Classroom. Part One: Introduction to Fractals and Chaos / H. O. Peitgen, H. Jurgens, D. Saupe. – Springer-Verlag, New York, 1992. – 450 p.

134. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – Из-во М.: Мир, 1991. – 254 с.

135. Liebovitch L. A Fast Algorithm to Detemline Fractal Dimensions by Box Counting / L. Liebovitch, T. Toth // *Physics Letters A*. – 1989. – Vol. 141. – P. 386-390.

136. Burrough. P.A. Principles of geographical systems for land resources assessment / P.A. Burrough. – Oxford University Press, 1986. – 193 p.

137. Рахман А. К М. Д. Мониторинг содержания Бенз(А)Пирена в 2001-2012 годах в створах реки Уфы / А. К М. Д. Рахман, Л.И. Кантор, Е.В. Дружинская, Е.А. Кантор // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 11 (167). – С. 38-43.

138. Афанасьева Е.С. Анализ загрязненности хлоридами р. Белой в створах Стерлитамакского района / Е.С. Афанасьева, Е.А. Кантор, В.И. Сафарова, Е.В. Фатьянова // Вода: химия и экология. – 2014. – № 6. – С.14-20.

139. Minigazimov N. City snow dumps of a large industrial centre as a source of surface water pollution (on the example of Ufa city) / N. Minigazimov, E. Khaidarshina, R. Abdrahmanov, V. Safarova et al.// Asian journal of water, environment and pollution. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 51-58.

140. Хатмуллина Р.М. Оценка антропогенного воздействия на р. Белую / Р.М. Хатмуллина, А.М. Сафаров, В.И. Сафарова, А.Р. Мухаматдинова // Вода: химия и экология. – 2017. – № 3 (105) . – С. 89-93.

141. Специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата МГЭИК. (2012). Управление рисками экстремальных явлений и стихийных бедствий для содействия адаптации к изменению климата. Специальный доклад рабочих групп I и II Межправительственной группы экспертов по изменению климата

142. Чепелов С.А. Оценка экологического риска загрязнения водных объектов/ С.А. Чепелов // Вестник витебского государственного технологического университета. – 2018. –№ 1 (34). – С. 109-114.

143. Тихомиров Н. П. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками / Н. П. Тихомиров. – Москва: Юнити-дана, 2003. – 350 с.

144. Вагизов М.Р. Введение в геоинформационное управление/ М.Р. Вагизов, Е.П. Истомин, О.Н. Колбина, С.П. Присяжнюк, А.Г. Соколов, Н.В. Яготинцева/ Учебное пособие. – СПб.: НП «БИУ», 2021 . – 352 с.

145. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям: (РД 52.24.643– 2002): официальное издание: утвержден и введен в действие Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) от 03.12.2002.– М.: Гидрохимический институт (ГХИ) Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2002. – 35 с.

146. Инструкция по нормированию сбросов сточных вод в поверхностные водные объекты: официальное издание: утвержден Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 20.01. 2006. – 11 с.

147. Трухин В.И. Общая и экологическая геофизика/ В.И. Трухин, К.В. Показеев, В.Е. Куницын – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.

148. Папенов К. В. Экономика природопользования: учебник для студентов высших учебных заведений / К. В. Папенов – Проспект Москва, 2016. – 866 с.

149. Гагаринова О. В. Устойчивость природных вод бассейна озера Байкал к антропогенным воздействиям / О. В. Гагаринова// География и природные ресурсы. – 2015. –№ 1. – С. 46 – 54.

150. Красногорская Н.Н. Фрактальная модель вероятности паводковых наводнений на примере бассейна реки Уфа / Н.Н. Красногорская, Е.А. Белозёрова, С.А. Мусина, Э.В. Нафикова // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Наука, образование, производство в решении экологических проблем» Экология-2018, г. Уфа 2018. – Т. 1. – С. 143-148.

151. Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282> (дата доступа 02.02.2021).

152. Гидрологические ежегодники Уральское управление гидрометеорологической службы. Т.4, выпуски 1963-1987 гг.

153. Государственный водный кадастр. – Раздел 1. Поверхностные воды. Реки и озера. – Серия 2. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши. Бассейн рек Кама и Урала. Бассейны реки на территории Республики Башкортостан. – Уфа. – 1991-2000. – 200 с.

154. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://meteo.ru/services-and-products/131-hydro-data>, свободный. Дата обращения 02.09.2017.

155. Ресурсы поверхностных вод СССР. Средний Урал и Приуралье /под редакцией Н.М. Алюшинской. – Т. 11. –Л.–М.: Гидрометеиздат, 1972– 391 с.

156. Доманицкий А.П. Реки и озера Советского Союза / А.П. Доманицкий, Р.Г. Дубровина, А.И. Исаева. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 104 с.

157. Геоинформационные карты геологической структуры Всероссийского научно-исследовательского института им. А.П. Карпинского официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://www.vsegei.ru/ru/structure/others/msk/index.php> (дата доступа 09.06.2017).

158. Карты Генерального штаба СССР 1981-1987 гг. / составление, оформление, дизайн Государственный научно-внедренческий центр геоинформационных систем и технологий ФГУП Госгисцентр. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://satmaps.info/> <http://loadmap.net/ru/catalog/c45/s25000/p4649> (дата доступа 09.06.2017).

159. Сайт Геологической службы США Данные SRTM – Обновляется в течение суток. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата доступа 02.02.2021).

160. Некоммерческий веб-картографический проект: официальный сайт. – Уфа. – Обновляется в течение суток. – URL: OpenStreetMap <https://www.openstreetmap.org> (дата доступа 15.03.2023).

161. Ergen K. An integrated map correlation method and multiple-source sites drainage - area ratio method for estimating streamflows at ungauged catchments. A case study of the Western Black Sea Region, Turkey / K. Ergen, E. Kentel // *Journal of Environmental Management*. – 2016. – Vol.166 – P. 309-320.

162. Zelelew M.B. Use of Cokriging and map correlation to study hydrological response patterns and select reference stream gauges for ungauged catchment / M.B. Zelelew, K. Alfredsen // *Journal of Hydrologic Engineering*. – 2014. – Vol. 19. – P. 388-406.

163. Drogue G. P. How can a few streamflow measurements help to predict daily hydrographs at almost ungauged sites? / G. P. Drogue, J. Plasse // *Hydrological Sciences Journal*. – 2014. – Vol. 59. – P. 2126-2142.

164. ArcGIS 9 Geostatistical tutorial. – ESRI. – 2003. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/pdf/geostatistical-analyst-tutorial.pdf> (дата доступа 22.03.2023).

165. Belozerova E. The map-correlation method for ungauged catchments streamflow prediction in the Ufa river, Russian Federation / E. Belozerova, N. Krasnogorskaya, A. Longobardi, E. Nafikova // *International Journal of Hydrology Science and Technology*. – 2019. – Vol. 9. – № 6. – P. 603-626.

166. Smakhtin, V. U. Generation of natural daily flow time series in regulated rivers using a nonlinear spatial interpolation technique / V. U. Smakhtin // *Regulated Rivers Research & Management*. – 1990. – Vol. 15. – P. 311–323.

167. Nash J.E. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles / J.E. Nash, J.V. Sutcliffe // *Journal of Hydrology*. – 1970. – Vol. 10 (3). – P. 282–290.

168. Виноградов А.Ю. Научные основы гидрологических ограничений при проектировании инженерных сооружений на малых лесных водотоках: специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/ Виноградов Алексей Юрьевич; ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский

государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова». – Санкт-Петербург, 2015. – 347 с.

169. Железняков Г. В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока. / Г.В. Железняков, Т.А. Неговская, Е. Е. Овчаров: под редю Г.В. Железняка. – М.: Колос,1984. – 205 с.

170. Farr T. G. The shuttle radar topography mission. / T.G. Farr et al.// CEOS SAR Workshop. Toulouse 26-29 Oct. 1999., Noordwijk. 2000. – P. 361-363.

171. Karwel A. K. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland / A. K. Karwel, I. Ewiak // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2008. – Vol. XXXVII, part B7. – P. 169–172.

172. Карионов Ю.И. Оценка точности матрицы высот SRTM / Ю.И. Карионов // Геопрофи. – 2010. – №10. – С.48-51.

173. Фарбер С. К. Перспективы использования данных srtm для решения лесных научно-практических задач / С. К. Фарбер, Н.С. Кузьмик, Н.В. Брюханов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 3. – № 4, – С. 85 -88.

174. Герман В.А., Картографирование природных гидрологических условий и ресурсов Приневского региона.: Санкт-Петербург, 2016. – 62 с.

Орлова Е.В. Определение географических и гидрологических характеристик водных объектов с использованием ГИС-технологий: специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Орлова Елена Викторовна; Государственный гидрологический институт. – Санкт-Петербург, 2008. – 218 с.

175. Hirt C. Comparison and validation of recent freely-available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia / C. Hirt, M.S. Filmer, W.E. Featherstone // Australian Journal of Earth Sciences.– 2010. – Vol. 57 (3). – P. 337–347.

176. Орлова Е.В. Определение географических и гидрологических характеристик водных объектов с использованием ГИС-технологий: специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Орлова Елена Викторовна; Государственный гидрологический институт. – Санкт-Петербург, 2008. – 218 с.

177. Павлова А.Н. Геоинформационное моделирование речного бассейна по данным спутниковой съемки SRTM (на примере бассейна р. Терешки) / А.Н. Павлова // Известия Саратовского университета. – 2009. – Т. 9. – С. 39-44.

178. Кащавцева А.Ю. Моделирование речных бассейнов средствами ArcGis 9.3 / А.Ю. Кащавцева, В.Д. Шипулин // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. – 2011. – Серия «География». – Т.24 (63). – №3. – С. 85-92.

179. Справка по ArcGIS 10: официальный сайт – Обновляется в течение суток. – URL: <https://doc.arcgis.com/en/> (дата доступа 11.07.2021).

180. Шихов А. Н. Геоинформационные системы: применение ГИС-технологий при решении гидрологических задач: практикум: учеб. пособие / А. Н. Шихов, Е. С. Черепанова, А. И. Пономарчук; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2014. – 91 с.

181. Richardson, L. F. The Problem of Contiguity: An Appendix to "Statistics of Deadly Quarrels"/ L. F. Richardson // General Systems Yearbook. – 1961. – Vol. 6. – P. 139-187.

182. Борняков С. А. Информационная энтропия и фрактальная размерность как критерий самоорганизации систем разрывов в зонах разломов (по результатам моделирования) / С. А. Борняков, А. Н. Адамович, А. С. Гладков, В. А. Клепиков, В. А. Матросов // Доклад академии наук. – 2003. – №2. – С. 250-253.

183. Ресурс QGIS: официальный сайт: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://plugins.qgis.org/plugins/minkowskiDimCalculator/> (дата доступа 17.04.2021).

184. Ресурс программного продукта FrakOut!: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://code.google.com/p/frakout/> (дата доступа 05.09.2018).

185. Ресурс программного продукта HARFA5.0: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/Imagesci> (дата доступа 05.09.2018).

186. Ресурс программного продукта NARO, разработанная Hiroyuki Sasaki в Национальной организации сельского хозяйства и исследования пищевых продуктов Японии. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://cse.naro.affrc.go.jp/sasaki/fractal/fractal-e.html> (дата доступа 05.09.2018).

187. Ресурс программы Imagej: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://imagej.nih.gov/ij/plugins/fractlac/FLHelp/Installation.htm> (дата обращения 11.07.2019).

188. Информационный сайт в области геоинформационных систем и дистанционного зондирования Земли. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://gis-lab.info/qa/minkowski-dimension-qgis.html> (дата обращения 31.10.2019).

189. Конюхов А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: учебное методическое пособие/ А.Л. Конюхов. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 105 с.

190. Anne F. Hydrological drought explained / F. Anne V. Loon // WIREs Water. – 2015. – Vol. 2. – P.359–392.

191 Башкирская энциклопедия: в 7 тт. — Уфа: НИ "Башкирская энциклопедия", 2005 – 2011.

192. Smakhtin V. Y. Regionalization of daily flow characteristics in part of the Eastern Cape, South Africa / V. Y. Smakhtin, , D. A. Hughes, E. Creuse-Naudin // Hydrological Sciences Journal. – 1997. – Vol. 42(6). – P. 919–936.

193. ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения = Hydrology of land. Terms and definitions: Государственный стандарт Союза ССР : издание официальное: утвержден Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 29 октября 1973 г. N 2394: дата введения 1975-01-01. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 36 с.

194. Захарко П.Н. Возможности совершенствования нормирования водопользования на предприятиях по производству молочных продуктов в республике беларусь с учетом опыта сопредельных стран / П.Н. Захарко, С.А. Дубенок // Природные ресурсы. – 2020. – Vol. 2. – С. 49 – 62.

195. Макаренко А.А. Конспект лекций по курсу «Географическое картографирование. Проектирование и составление карт». Обзорные общегеографические карты. Часть 1./ А.А. Макаренко, В.С. Моисеева – М.: МИИГАиК, 2010. – 67 с.

196. Программный продукт MathWorks: официальный сайт.– Обновляется в течение суток. – URL: <http://https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html>. (дата обращения 11.07.2019).

197. Saa A. Comparison of gliding box and box-counting methods in river network analysis / A. Saa, G. Gasco, J. B. Grau, J. M. Anton, A. M. Tarquis // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2007. – Vol. 14. – P. 603–613.

198. Tian S. Comparison of traditional methods and fractal dimension method in river pattern discrimination / S. Tian, W. Wang, H. Shang, H. Peng // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 5(23). – P. 5450-5456.

199. Иванов А.В. Аналогии в строении природных эрозионных структур и кривой Коха: предпосылки качественного сопоставления/ А.В. Иванов, А.С. Шешнёв, И.А. Яшков // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 359. – С. 188-192.

200. Красногорская Н.Н. Методология определения фрактальной размерности водосборной территории / Н.Н. Красногорская, Е.А. Белозерова // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 62. – С. 52-74.

201. Бондарчук С.С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel: учебное пособие. / С.С. Бондарчук, И.С. Бондарчук. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2018. – 433 с.

202. Махлаёв В.К. Гидрология: Методические указания к самостоятельной работе по дисциплине СД. Ф. 17 «Гидрология, гидрометрия и гидротехнические сооружения» для студентов специальности 270112 «Водоснабжение и водоотведение» всех форм обучения– Томск: Издательство Томского государственного архитектурно – строительного университета, 2009. – 33 с.

203. Szustalewicz A. Calculating the fractal dimension of river basins, comparison of several methods / A. Szustalewicz, A. Vassilopoulos // Biometrics, Computer Security Systems and Artificial Intelligence Applications. – P. 299- 309.

204. Качество поверхностных вод российской федерации ежегодник 2020/ коллектив авторов под редакцией М.М. Трофимчук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрохимический институт», 2021. – 612 с.

205. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы / коллектив авторов; под редакцией Георгиевского В.Ю. – Ливны: Издатель Мухаметов Г.В., 2015. – 373 с.

206. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://www.mchs.gov.ru> (дата обращения 28.06.17).

207. Сметанин В.И. Фрактальная модель распределения вероятности паводковых наводнений на территории Рязанской области / В.И. Сметанин, А.Н. Насонов, И.М. Жогин, И.В. Цветков // Проблемы управления водными и

земельными ресурсами. Материалы Международного научного форума, Москва, 30 сентября 2015. –М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2015. – С.181-190.

208. Красногорская Н.Н. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами / Н.Н. Красногорская, Е.А. Белозерова // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 65. –С. 702-725.

209. Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2011- 2019 гг. : официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures/> (дата обращения 22.04.20).

210. Министерство экологии Челябинской области. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2019 году: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://mineco.gov74.ru/mineco/other/protectingthepublic.htm> (дата обращения 22.04.20).

211. Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края. Государственный ежегодный доклад «Состояние и охрана окружающей среды Пермского края» за 2019 г.: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://priroda.permkrai.ru/deyatelnost/okhrana-okruzhayushchey-sredy/doklad-o-sostoyanii-i-ob-okhrane-okruzhayushchey-sredy-permskogo-kraja> (дата обращения 22.04.20).

212. Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2019 году : официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126> (дата обращения 22.04.20).

213. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: официальный сайт. – Обновляется в течение суток. – URL: <http://gosdoklad-ecology.ru/2018/subjects/pfo/respublika-bashkortostan/> (дата обращения 22.04.20).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1– Результаты кросс-валидации при моделировании поверхности с помощью вариограммы

Створы	Средняя	Средняя квадратичная	Средняя нормированная	Среднеквадрат. нормированная	Средняя стандартная ошибка
UN	-0,00450	0,17401	-0,01621	0,98211	0,18116
UM	-0,01292	0,17508	-0,05947	1,07658	0,15968
UK	-0,00904	0,16419	-0,03218	0,95044	0,17983
UV	-0,00638	0,18013	-0,02087	0,98745	0,18764
UP	-0,00398	0,17456	-0,01179	0,94876	0,18735
AV	0,00135	0,17660	0,01383	0,90201	0,20419
AM	-0,00154	0,16720	-0,00910	1,00014	0,16731
AZ	0,00176	0,11356	0,01410	0,99079	0,11516
AL	-0,00430	0,20377	-0,00589	0,96545	0,21150
JV	0,00054	0,16186	0,01245	0,88476	0,19328
JC	-0,00535	0,18188	-0,01286	0,96238	0,18982
JA	0,00062	0,17247	0,01574	0,94659	0,18915
JE	-0,00182	0,10202	0,00551	0,74878	0,14585
JJ	-0,00260	0,08761	-0,02385	0,85920	0,10543
BG	-0,00780	0,15869	-0,03044	0,95743	0,17234
TZ	0,00698	0,12961	0,03056	0,81439	0,16834
KM	-0,00450	0,17401	-0,01621	0,98211	0,18116
BA	0,00936	0,16432	0,04851	0,96950	0,17087
TG	-0,00904	0,15997	-0,05398	1,01321	0,15989
SS	-0,00741	0,17778	-0,04182	0,92243	0,19554
TT	-0,01223	0,13530	-0,04359	0,87492	0,16428
YE	-0,00340	0,16697	-0,02126	1,01921	0,16299
KK	0,00716	0,18504	0,03791	1,00770	0,18425
BI	0,00772	0,19440	0,03853	0,99249	0,19649
VK	-0,00632	0,15237	-0,01819	0,89082	0,18178

Таблица 2 – Результаты кросс-валидации при моделировании поверхности с помощью ковариации

Створы	Средняя	Средняя квадратичная	Средняя нормированная	Среднеквадрат. нормированная	Средняя стандартная ошибка
UN	0,00532	0,16790	0,02516	0,86898	0,19984
UM	-0,02181	0,17926	-0,12273	1,03286	0,17416
UK	-0,00387	0,16496	-0,01476	0,91793	0,18280
UV	0,00023	0,18213	0,00341	0,96970	0,19071
UP	-0,00240	0,17319	-0,00963	0,95714	0,18239
AV	-0,00986	0,20023	-0,02642	1,00839	0,20125
AM	-0,00154	0,16720	-0,00929	1,02077	0,16393
AZ	0,00176	0,11356	0,01417	0,99590	0,11456

Створы	Средняя	Средняя квадратичная	Средняя нормированная	Среднеквадрат. нормированная	Средняя стандартная ошибка
AL	0,00856	0,17602	0,03693	0,93080	0,19580
JV	-0,00077	0,17182	0,00764	1,01197	0,17804
JC	-0,02246	0,16366	-0,10996	0,85712	0,18838
JA	0,00072	0,17233	0,00420	0,91876	0,19369
JE	0,00165	0,11659	0,01650	0,87332	0,13790
JJ	-0,00237	0,08807	-0,02409	0,84946	0,10525
BG	-0,00306	0,15874	-0,01227	0,91651	0,17607
TZ	0,00038	0,13273	0,00311	1,13792	0,14239
KM	0,00532	0,16790	0,02516	0,86898	0,19984
BA	0,01405	0,16567	0,06889	0,94608	0,17844
TG	-0,00637	0,15294	-0,03383	0,93099	0,16633
SS	-0,00945	0,17837	-0,05240	0,96819	0,18600
TT	-0,00591	0,13656	-0,01667	0,86982	0,16445
YE	0,01243	0,18990	0,04921	1,01740	0,18167
KK	0,00716	0,18504	0,03888	1,03340	0,17966
BI	0,00773	0,19440	0,03943	1,01572	0,19200
VK	0,00582	0,15897	0,03133	0,94737	0,17295

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица – Характеристики малых рек, входящих в водосборный бассейн р. Уфы, полученные с помощью метода геомоделирования расходов воды по значению модуля стока

ID	Name	NAME_ENG	Area	АРФР	L	LengthMi	Q from ArcGIS	Средняя высота водосбора
1	Агерьяв	Ageriav	195	1,14	20,57	12,78	1,67	397,86
2	Ай исток	Ai istok	1338	1,29	146,03	90,74	10,54	636,70
3	Аллаелга	Allaelga	325	1,24	45,66	28,38	2,32	402,07
4	Арганча	Argancha	151	1,21	35,04	21,77	1,03	365,13
5	Артя	Artja	618	1,21	64,56	40,12	4,72	326,94
6	Аскиш	Askish	263	1,21	31,00	19,26	2,49	211,83
7	Атавка	Atavka	150	1,04	37,35	23,21	1,28	340,45
8	Атер	Aterr	300	1,13	63,23	39,29	2,80	230,17
9	Атерь	Ater	217	1,17	36,42	22,63	2,06	243,79
10	Ачит	Achit	152	1,05	18,05	11,22	1,32	258,98
11	Аяз	Ajaz	253	1,26	33,14	20,59	2,37	344,10
12	Байки	Baiki	152	1,22	23,43	14,56	2,49	214,00
13	Бардым (Серга)	BardimSerga	642	1,24	76,98	47,84	4,76	466,14
14	Бардым (Уфа)	BardimUfa	209	1,12	24,30	15,10	1,61	292,85
15	Баяк	Bajak	115	1,14	20,32	12,63	0,97	272,54
16	Бейда	Beida	138	1,19	30,96	19,24	1,00	432,58
17	Белый Атиг	Belii Atig	202	1,19	33,23	20,65	1,50	376,22
18	Бердяшка	Berdjashka	317	1,12	28,39	17,64	3,06	323,55
19	Березяк	<u>Berezjak</u>	313	1,14	47,04	29,23	3,79	356,00
20	Бисерть	Bisert	864	1,29	80,23	49,85	7,81	344,42
21	Биявашка	Bijavashka	138	1,12	26,38	16,39	1,34	280,92
22	Большая Арша	Bolshaja Arsha	170	1,08	21,17	13,15	1,48	482,58
23	Большая Арша	Bolshaya Arsha	326	1,23	52,73	32,76	2,60	469,73
24	Большая Сатка	Bolshaja Satka	411	1,23	58,64	36,44	3,34	708,38
25	Большая Сатка	Bolshaya Satka	1354	1,30	100,79	62,63	9,67	597,62
26	Большая Ургала	Bolshaja Uralga	140	1,21	28,05	17,43	1,12	449,10
27	Большая Ургала	Bolshaya Uralga	336	1,22	33,10	20,57	2,68	436,52
28	Большой Бердяуш	Bolshoi Berdjayzh	154	1,20	19,13	11,89	1,18	465,28
29	Большой Бердяш	Bolshoi Berdjazh	115	1,08	14,65	9,11	1,11	405,25

ID	Name	NAME_ENG	Area	АРФР	L	LengthMi	Q from ArcGIS	Средняя высота водосбора
30	Большой Ик	Bolshoi Ik	153	1,22	22,37	13,90	0,99	405,47
31	Большой Ик	Bolshoi Ik	420	1,27	52,06	32,35	4,85	370,16
32	Большой Ик	Bolshoi Ik	1474	1,31	115,54	71,80	10,43	343,38
33	Большой Ирмиз	Bolshoi Irmiz	104	1,18	20,19	12,55	0,84	318,97
34	Большой Кудаш	Bolshoi Kudash	135	1,11	22,59	14,04	1,27	345,33
35	Большой Суховяз	Bolshoi Sukhovjaz	115	1,23	21,00	13,05	0,96	438,58
36	Бугалыш	Bugalish	163	1,08	24,17	15,02	1,39	276,17
37	Буланка	Bulanka	238	1,17	42,45	26,38	2,55	580,35
38	Бурминка	Burminka	289	1,13	35,14	21,84	2,70	209,59
39	Васелга	Veselga	192	1,24	32,08	19,93	1,24	359,96
40	Васелга	Vaselga	349	1,23	50,72	31,52	2,20	358,85
41	Еманз-Елга	EmanzElga	475	1,23	50,88	31,62	3,69	345,36
42	Жаланда	Zhalanda	232	1,14	41,05	25,51	2,50	146,60
43	Золотой Ключ	Zolotoi Kluch	95	1,21	8,99	5,58	0,81	260,02
44	Изьяк	Izyak	684	1,29	90,02	55,94	7,42	180,54
45	Ик (Ай)	Ik Ai	747	1,28	80,75	50,18	5,49	354,99
46	Ик (Киги)	Ik Kigi	528	1,20	75,28	46,78	3,61	369,00
47	Илек	Ilek	157	1,15	25,18	15,65	1,31	364,98
48	Карзя	Karzja	263	1,17	15,37	9,55	2,08	299,63
49	Касамаевка	Kasamaevka	195	1,06	43,02	26,73	1,66	359,64
50	Катав	Katav	482	1,26	52,71	32,75	5,69	715,75
51	Катав	Katav	1088	1,28	114,21	70,97	10,57	604,85
52	Киги	Kigi	673	1,26	73,59	45,73	4,58	349,31
53	Киги	Kigi	1366	1,29	102,47	63,68	10,19	350,14
54	Круш	Krush	402	1,21	39,04	24,26	3,84	366,88
55	Куваш	Kuvash	309	1,23	41,31	25,67	2,44	608,48
56	Куказар	Kukazar	332	1,28	44,48	27,64	2,22	439,05
57	Кунгак	Kuganak	192	1,17	37,54	23,33	1,89	309,12
58	Курга	Kyrga	162	1,17	21,65	13,45	1,06	361,13
59	Куса	Kusa	624	1,25	61,26	38,07	4,99	499,68
60	Кусейка	Kuseika	133	1,17	25,36	15,76	0,92	<u>327,44</u>
61	Кушкаяк	Kushkajak	251	1,13	18,84	11,70	1,89	309,47
62	Лемазы	Lemazi	197	1,07	24,50	15,22	1,51	299,74
63	Леун	Leun	270	1,20	34,59	21,50	2,81	236,21
64	Лобовка	Lobovka	334	1,10	52,01	32,32	3,61	164,93
65	Малая Сатка	Malaja Satka	462	1,21	49,33	30,66	3,67	624,31
66	Малая Ургала	Malaja Uralga	173	1,15	27,76	17,25	1,39	433,82
67	Малтуга	Maltuga	68	1,14	12,80	7,95	1,68	365,57
68	Маниска	Maniska	204	1,26	31,82	19,77	1,39	458,83
69	Манчаж	Manchzh	98	1,10	19,03	11,83	0,80	292,31
70	Маскара	Maskara	194	1,24	40,30	25,05	1,29	359,26

ID	Name	NAME_ENG	Area	АРФР	L	LengthMi	Q from ArcGIS	Средняя высота водосбора
71	Маш	Mash	218	1,16	42,87	26,64	2,19	287,85
72	Мелекас	Melekas	516	1,20	58,19	36,16	4,42	325,50
73	Минка	Minka	162	1,15	33,29	20,69	1,54	451,35
74	Миса-Елга	MisaElga	105	1,14	30,06	18,68	0,92	486,25
75	Нила	Nila	254	1,16	31,05	19,30	3,01	588,17
76	Нязя	Njanja	308	1,25	33,25	20,66	2,10	445,39
77	Ока	Oka	421	1,15	68,56	42,60	3,31	315,51
78	Пут	Put	460	1,23	54,87	34,10	3,73	361,08
79	Сабарда	Sabarda	253	1,18	<u>28,57</u>	<u>17,75</u>	2,45	363,59
80	Салдыбаш	Saldibash	291	1,18	56,12	34,87	3,14	241,48
81	Сарана	Sarana	296	1,19	30,47	18,93	2,88	342,13
82	Сарва	Sarva	287	1,10	14,85	9,23	3,11	342,21
83	Саргая	Sargaja	140	1,18	21,00	13,05	1,30	360,80
84	Сарс	Sars	410	1,25	66,64	41,41	4,12	329,41
85	Серга	Sarga	409	1,25	45,12	28,04	3,03	447,19
86	Суя	Suja	300	1,11	46,44	28,86	2,21	313,35
87	Тавра	Tavra	118	1,06	11,56	7,18	1,00	280,26
88	Таушка	Tayshka	425	1,20	41,83	25,99	4,56	158,23
89	Титнигул	Tatnigul	107	1,06	21,03	13,07	0,90	269,58
90	Тюй	Tui	699	1,24	134,02	83,28	7,40	217,81
91	Улуир	Uluir	325	1,20	46,89	29,14	2,21	466,86
92	Упуда	Upuda	193	1,27	25,18	15,65	1,46	374,04
93	Ураим	Uraim	466	1,32	75,34	46,82	8,56	405,28
94	Усть-Канда	UstKanda	213	1,19	35,01	21,75	1,91	363,03
95	Ут	Ut	551	1,20	78,47	48,76	4,62	303,28
96	Утяшта	Utjashta	79	1,12	11,90	7,40	0,51	379,84
97	Уфа 4	Ufa	1915	1,40	69,87	43,42	16,93	422,66
98	Уфалейка	Ufaleika	354	1,27	40,54	25,19	2,96	447,13
99	Чекалда	Chekalda	151	1,19	28,31	17,59	1,25	307,65
100	Юва	Uva	186	1,13	14,90	9,26	1,60	249,98
101	Яманзелга	Jamanzelga	228	1,05	32,88	20,43	2,05	285,78

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Значения коэффициентов корреляции для каждой пары створов на территории водосборного бассейна р. Уфы

Створы	UN	UM	UK	UV	UP	AV	AM	AZ	AL	JV	JC	JA	JE	JJ	BG	TZ	KM	BA	TG	SS	TT	YE	KK	BI	VK
UN	1,00	0,65	0,82	0,81	0,72	0,82	0,83	0,82	0,87	0,78	0,43	0,78	0,74	0,61	0,88	0,58	1,00	0,79	0,81	0,45	0,62	0,74	0,51	0,28	0,79
UM	0,65	1,00	0,69	0,68	0,60	0,58	0,66	0,57	0,63	0,58	0,30	0,63	0,47	0,55	0,68	0,41	0,65	0,48	0,60	0,30	0,49	0,36	0,33	0,16	0,58
UK	0,82	0,69	1,00	0,95	0,91	0,76	0,86	0,76	0,77	0,76	0,44	0,80	0,74	0,65	0,94	0,58	0,82	0,60	0,88	0,48	0,71	0,77	0,39	0,24	0,81
UV	0,81	0,68	0,95	1,00	0,90	0,77	0,92	0,79	0,83	0,78	0,44	0,85	0,78	0,66	0,90	0,56	0,81	0,65	0,83	0,43	0,72	0,75	0,46	0,25	0,81
UP	0,72	0,60	0,91	0,90	1,00	0,71	0,82	0,71	0,72	0,73	0,42	0,77	0,71	0,64	0,81	0,54	0,72	0,53	0,78	0,42	0,72	0,62	0,41	0,21	0,75
AV	0,82	0,58	0,76	0,77	0,71	1,00	0,78	0,94	0,86	0,87	0,43	0,80	0,85	0,66	0,78	0,56	0,82	0,68	0,70	0,37	0,78	0,69	0,41	0,20	0,83
AM	0,83	0,66	0,86	0,92	0,82	0,78	1,00	0,80	0,89	0,79	0,47	0,86	0,74	0,58	0,84	0,52	0,83	0,74	0,78	0,44	0,65	0,69	0,58	0,33	0,78
AZ	0,82	0,57	0,76	0,79	0,71	0,94	0,80	1,00	0,90	0,90	0,58	0,86	0,87	0,68	0,78	0,59	0,82	0,73	0,70	0,72	0,76	0,64	-	0,70	0,83
AL	0,87	0,63	0,77	0,83	0,72	0,86	0,89	0,90	1,00	0,89	0,51	0,88	0,83	0,62	0,81	0,59	0,87	0,81	0,74	0,42	0,69	0,69	0,57	0,30	0,83
JV	0,78	0,58	0,76	0,78	0,73	0,87	0,79	0,90	0,89	1,00	0,49	0,87	0,95	0,78	0,76	0,60	0,78	0,68	0,69	0,37	0,86	0,68	0,44	0,23	0,91
JC	0,43	0,30	0,44	0,44	0,42	0,43	0,47	0,58	0,51	0,49	1,00	0,52	0,61	0,39	0,43	0,39	0,43	0,38	0,39	0,22	0,43	0,69	0,22	0,15	0,46
JA	0,78	0,63	0,80	0,85	0,77	0,80	0,86	0,86	0,88	0,87	0,52	1,00	0,83	0,71	0,80	0,55	0,78	0,67	0,73	0,41	0,76	0,66	0,49	0,26	0,84
JE	0,74	0,47	0,74	0,78	0,71	0,85	0,74	0,87	0,83	0,95	0,61	0,83	1,00	0,82	0,75	0,62	0,74	0,66	0,69	0,70	0,88	0,67	0,41	0,21	0,91
JJ	0,61	0,55	0,65	0,66	0,64	0,66	0,58	0,68	0,62	0,78	0,39	0,71	0,82	1,00	0,65	0,49	0,61	0,50	0,61	0,63	0,84	0,54	-	0,47	0,85
BG	0,88	0,68	0,94	0,90	0,81	0,78	0,84	0,78	0,81	0,76	0,43	0,80	0,75	0,65	1,00	0,60	0,88	0,70	0,90	0,50	0,66	0,81	0,45	0,26	0,81
TZ	0,58	0,41	0,58	0,56	0,54	0,56	0,52	0,59	0,59	0,60	0,39	0,55	0,62	0,49	0,60	1,00	0,58	0,50	0,58	0,55	0,55	0,42	0,18	0,15	0,58
KM	1,00	0,65	0,82	0,81	0,72	0,82	0,83	0,82	0,87	0,78	0,43	0,78	0,74	0,61	0,88	0,58	1,00	0,79	0,81	0,45	0,62	0,74	0,51	0,28	0,79
BA	0,79	0,48	0,60	0,65	0,53	0,68	0,74	0,73	0,81	0,68	0,38	0,67	0,66	0,50	0,70	0,50	0,79	1,00	0,62	0,36	0,49	0,66	0,47	0,28	0,66
TG	0,81	0,60	0,88	0,83	0,78	0,70	0,78	0,70	0,74	0,69	0,39	0,73	0,69	0,61	0,90	0,58	0,81	0,62	1,00	0,50	0,60	0,82	0,43	0,25	0,75
SS	0,45	0,30	0,48	0,43	0,42	0,37	0,44	0,72	0,42	0,37	0,22	0,41	0,70	0,63	0,50	0,55	0,45	0,36	0,50	1,00	0,33	0,64	0,13	0,15	0,40
TT	0,62	0,49	0,71	0,72	0,72	0,78	0,65	0,76	0,69	0,86	0,43	0,76	0,88	0,84	0,66	0,55	0,62	0,49	0,60	0,33	1,00	0,58	0,27	0,17	0,85
YE	0,74	0,36	0,77	0,75	0,62	0,69	0,69	0,64	0,69	0,68	0,69	0,66	0,67	0,54	0,81	0,42	0,74	0,66	0,82	0,64	0,58	1,00	0,48	0,15	0,78
KK	0,51	0,33	0,39	0,46	0,41	0,41	0,58	-	0,57	0,44	0,22	0,49	0,41	-	0,45	0,18	0,51	0,47	0,43	0,13	0,27	0,48	1,00	0,14	0,40
BI	0,28	0,16	0,24	0,25	0,21	0,20	0,33	0,70	0,30	0,23	0,15	0,26	0,21	0,47	0,26	0,15	0,28	0,28	0,25	0,15	0,17	0,15	0,14	1,00	0,23
VK	0,79	0,58	0,81	0,81	0,75	0,83	0,78	0,83	0,83	0,91	0,46	0,84	0,91	0,85	0,81	0,58	0,79	0,66	0,75	0,40	0,85	0,78	0,40	0,23	1,00