

На правах рукописи

Белозерова Елена Алексеевна

**ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИМ РИСКОМ**

1.6.20 – Геоинформатика, картография

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Уфа 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель: **Красногорская Наталия Николаевна**, доктор технических наук, профессор, научный консультант ООО "Научно-производственное объединение "Юнисол"

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

Кириенко Андрей Васильевич, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-производственного центра АО НПП «Авиационная и Морская Электроника»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Защита диссертации состоится «21» ноября 2023 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, дом 98, ауд. конференц-зал ЛСО

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «__» октября 2023 года

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.365.01
доктор технических наук, доцент

Соколов А.Г.

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 как разнородные данные (географические, гидрологические, гидрохимические, климатические, демографические), так и данные 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, становится особенно актуальным.

Цель работы: создание геоинформационной системы поддержки принятия решений для 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*);
2. Разработка методики геомоделирования расходов воды в реках с недостаточной гидрологической изученностью (*паспорт специальности п. 7*);
3. Разработка методологии определения фрактальной размерности гидрографической сети (*паспорт специальности п. 1*);
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, п. 21*).

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., Fencia 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'ó 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 система 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 характеристики 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 61 рисунок, 32 таблицы, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, сформулированы положения научной новизны и практической значимости работы.

В первой главе выполнен анализ применения геоинформационных систем для принятия решений по управлению территориями. Рассмотрены современные подходы к моделированию расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью. Произведен обзор методов расчета фрактальной размерности самоорганизующихся систем. Исследованы основные способы управления рисками истощения и загрязнения водосборной территории с использованием геоинформационных систем.

Во второй главе приведено описание водосборного бассейна р. Уфа и методов исследования. Определен перечень разнородных пространственных данных, необходимых для управления рисками на водосборе.

В качестве входных данных в настоящей работе использованы гидрологические, гидрохимические показатели водотоков и пространственные данные, относящиеся к водосборному бассейну р. Уфа (рис.1, табл. 1), а также данные о численности населения, проживающего на территории водосборного бассейна.

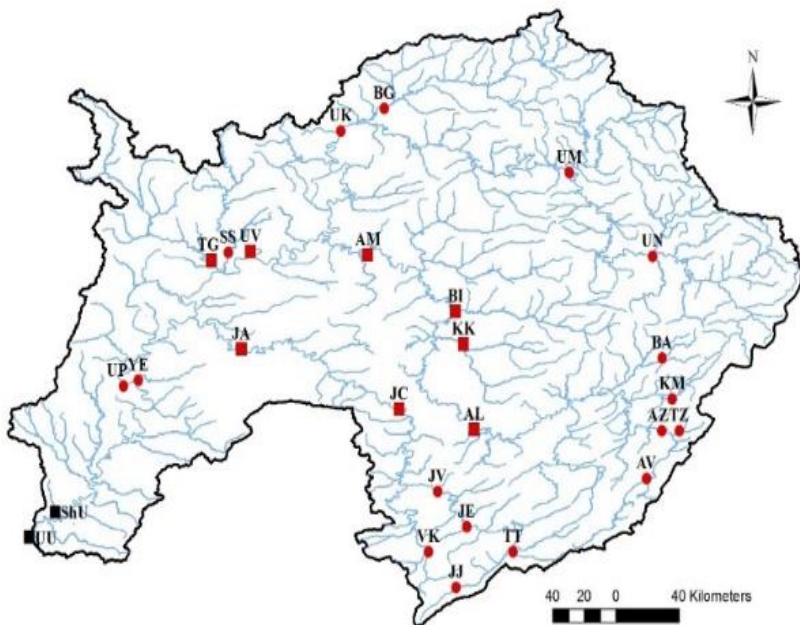


Рисунок 1 – Структура данных, используемых при исследовании

Таблица 1 – Обозначение и координаты гидрологических постов

№	Название поста	Усл. об-е	Период наблюдения
	р. Уфа - г. Нязепетровск	UN	1963-1987
2	р. Уфа - г. Михайловск	UM	1966-1969, 1971, 1974-1987
3	р. Уфа - г. Красноуфимск	UK	1963-1987
4	р. Уфа - с. Верхний Суян	UV	1966-1987
5	р. Уфа -Павловская ГЭС, нижний бьеф	UP	1963-1987
6	р. Ай - с. Веселовка	AV	1966-1987
7	р. Ай - с. Метели	AM	1963-1987
8	р. Ай - г. Златоуст	AZ	1963-1979
9	р. Ай - с. Лаклы	AL	1963-1987
10	р. Юрюзань - пгт. Вязовая	JV	1966-1987
11	р. Юрюзань - д. Чулпан	JC	1963-1987
12	р. Юрюзань - пос. Атяш	JA	1963-1987
13	р. Юрюзань - с. Екатериновка	JE	1963-1979, 1982
14	р. Юрюзань - ж. д ст. Юрюзань	JJ	1966-1974
15	р. Бисерть - с. Гайны	BG	1963-1987
16	р. Тесьма - г. Златоуст	TZ	1963-1987
17	р. Куса - пгт Магнитка	KM	1965-1987
18	р. Большая Арша - д. Вознесенская	BA	1963-1987
19	р. Тюй - д. Гумбино	TG	1963-1987
20	р. Сарс - с. Султанбеково	SS	1963-1987
21	р. Тюлюк - с. Тюлюк	TT	1965-1987
22	р. Яманелга - выше ист. Тюба (Устье)	YE	1971-1986
23	р. Киги - д. Кондаковка	KK	1980-1987
24	р. Большой Ик - д. Таишево	BI	1963-1987
25	р. Катав - п. Верхний Катав	VK	1966-1987
26	р. Уфа - г. Уфа	UU	-
27	р. Шугуровка - г. Уфа	ShU	-

- **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.

- **гидрохимические:** по 10 створам, расположенным на территории республики Башкортостан. Проанализированы результаты химического анализа более чем 13 700 ежемесячных проб воды, опубликованные в материалах Государственного водного кадастра за период 1991-2000 гг.

- **пространственные:** карты почв исследуемой территории; топографические карты исследуемой территории; цифровая модель рельефа (ЦМР).

На рисунке 2 представлена систематизация исходной информации и ее распределение по базам данных.



Рисунок 2 – Исходные данные для построения геоинформационной системы управления рисками на водосборе р. Уфа

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».

Третья глава посвящена формированию методики геомоделирования расходов воды в реках при недостаточности гидрометрических наблюдений на примере р. Уфа. Доказано, что пространственная близость водотоков не является универсальным критерием для выбора реки-аналога при определении расходов воды.

Поэтому для определения расходов воды использовались следующие подходы: метод корреляции карт (для поиска створа-аналога) и определения расходов с использованием карты модуля стока.

Метод корреляции карт (Map correlation method. Archfield S.A., Vogel R.M. 2010) – геостатистический метод, основанный на подборе реки-аналога по интерполяции коэффициентов корреляции гидрографов рек и определении расхода воды на основе реки-аналога с наибольшей корреляцией. Исследование проводилось с использованием данных ежедневных расходов воды в реках на 25 гидрологических створах (табл. 1).

Апробация метода началась с моделирования пропущенных значений корреляции гидрографов рек бассейна р. Уфа, когда один створ выбирался за опорный, относительно которого и определялись коэффициенты корреляции, а известные значения корреляций по очереди пропускались и определялись с помощью модели интерполяционного покрытия. Для получения

коэффициентов смоделированной корреляции гидрографов рек (Γ_{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 приведена карта зонирования пространственного распространения Γ_{mod} , в качестве опорного пункта принят р. Уфа – г. Нязепетровск (UN). Подобные карты позволяют определить район нахождения реки-аналога, обладающего наибольшей корреляцией.

По методу соотношения площадей водосборов (формула 1) для каждого из 25 исследуемых створов рассчитано значение среднесуточного расхода воды в исследуемых створах.

$$Q_1 = A_1/A_2 \cdot Q_2 \quad (1)$$

где Q_1 – расход воды в реке для створа, не обеспеченного данными гидрологических исследований, м³/сек;

Q_2 – расход воды в реке для створа, обеспеченного гидрологическими измерениями, обладающего наибольшей корреляцией с исследуемым Q_1 , м³/сек;

A_1 – площадь водосбора, не обеспеченного данными гидрологических исследований, км²;

A_2 – площади водосбора, обеспеченного данными гидрологических исследований, км².

Значения среднесуточных расходов в каждом створе на реках поочередно принимались за неизвестное и определялись на основе формулы 1. Таким образом получено 600 расчетных значений расходов воды, для 25 исследуемых створов. В качестве критерия для оценки соответствия фактических и смоделированных гидрографов использовались:

- относительная погрешность измерения, δ %;
- критерий Нэша-Сатклифа (NSE).

На основе сопоставления карт районирования по гидрологической однородности (пример – рисунок 3) и значений расходов рек, рассчитанных на основе рек-аналогов Q_{mod} , с учетом величин δ % и NSE, установлено, что недостаточно основывать выбор створа-аналога только на самом высоком значении корреляции, важно учитывать порядок рек и размеры водосбора.

В настоящей работе для исследуемой территории предложено изменить алгоритм метода корреляции карт, а именно разделять территорию по водосборам и определять створ-аналог по максимальному значению Γ_{mod} в пределах одного бассейна. Причем, если «неизмеренный» створ находится на притоке, то в качестве ближайшего аналога выбирается створ, расположенный на том же притоке.

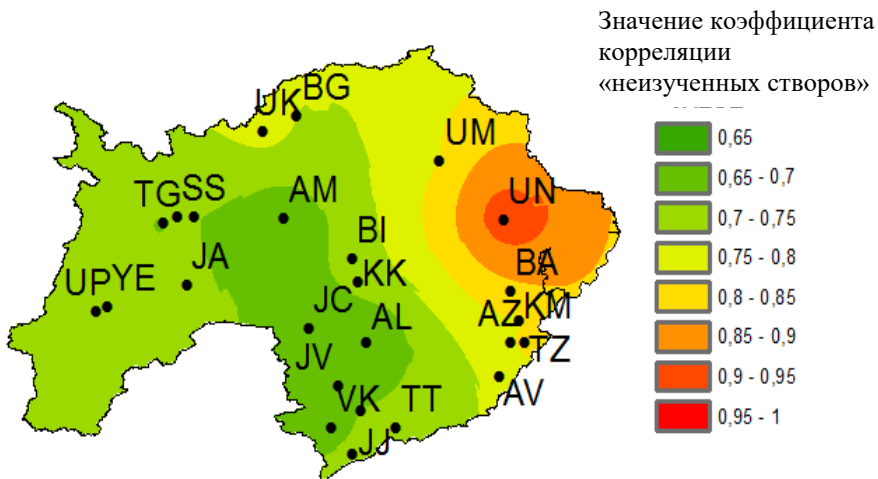


Рисунок 3 – Выделение районов гидрологической однородности, на основе коэффициентов корреляции гидрографов (водосбор р. Уфа)

Для сокращения времени методика расчета расхода воды в реках на основе реки-аналога реализована в виде программы для ЭВМ «Определение эталонного поста в водосборном бассейне».

Метод геомоделирования расходов воды в реках по значению модуля стока.

Дополнительным методом определения расходов воды при недостаточности данных гидрометрических наблюдений на малых реках является определение расходов с помощью построения карты модуля стока.

Для построения расхода воды для каждой точки гидрологической сети использовались растры суммарного стока и модуля стока. Модуль стока – это отношение расхода воды к площади водосборного бассейна, растр суммарного стока – это площадь водосбора, выраженная в количестве пикселей электронной карты.

Значения расхода в каждом исследуемом створе речной сети определялись путем умножения растра суммарного стока на растр модуля стока с учетом масштабного коэффициента (формула 2).

$$Q = M \cdot A \cdot c / 10^3, \quad (2)$$

где Q – расход воды м³/сек, A – площадь водосбора, км²;

M – модуль стока м³/(с × км²);

c – масштабный коэффициент перевода площади ячейки электронной карты в участок на площади водосбора, $c = 0,0051144$.

Достоверность метода апробирована на створах с известными значениями расхода воды. Результаты апробации двух рассмотренных методов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения среднесуточных расходов воды в исследуемых створах, полученных с помощью двух методов корреляции карт и построения карт модуля стока

№	Опорный пост	Пост с наибольшей r с учетом бассейнового подхода	δ_1 , % Метод корреляции карт	δ_2 , % Построения карты модуля стока	A, км ²	ГОСТ 19179-73 Гидрология суши
1	UN	UK	3,56	41,29	53 100	Большие реки
2	UM	UN	6,91	4,7	53 100	
3	UK	UP	1,35	20,89	53 100	
4	UV	UK	8,96	34,63	53 100	
5	UP	UK	1,33	22,06	53 100	
6	AV	AZ	8,03	9,91	15 000	Средние реки
7	AM	AV	16,0	28,98	15 000	
8	AZ	AV	7,43	21,82	15 000	
9	AL	AV	10,08	10,15	15 000	
10	JV	JE	2,19	14,8	7 240	
11	JC	JV	4,91	14,8	7 240	
12	JA	JJ	11,31	7,83	7 240	
13	JE	JV	2,15	5,23	7 240	
14	JJ	JE	44,85	19,51	7 240	
15	BG	UK	8,02	8,97	3 400	
16	TG	SS	10,15	8,96	3700	Малые реки
17	TZ	AZ	30	3,53	147	
18	KM	BA	37,4	7,52	621	
19	BA	TZ	37,08	11,41	910	
20	SS	TG	9,21	5,71	1 370	
21	TT	JE	33,19	13,81	150	
22	YE	UP	452,8	94,48	721	
23	KK	TZ	82,57	14,97	1 370	
24	BI	AV	11,71	15,91	1 460	
25	VK	JJ	33,59	10,86	1 100	

Как видно из таблицы 2 метод корреляции карт применительно к большим и средним рекам (ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения), относящихся к одному бассейну, показал, что относительная погрешность определения расходов воды для рек не превышает 16%.

Метод геомоделирования по значениям модуля стока 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.

Результат, выносимый на защиту: Методика геомоделирования расходов воды в реках на территориях с недостаточной гидрологической изученностью.

В четвертой главе настоящего исследования изложена методология определения фрактальной размерности (D) водосборной территории. В рамках исследования фрактальных размерностей речных систем установлено отсутствие единой методологии по следующим вопросам:

- достоверность фрактальной размерности в зависимости от масштаба исследуемого объекта;
- изменение точности расчета при использовании различных программ;
- влияние разрешения изображения исследуемых карт при расчете фрактальной размерности.

Для установления единого подхода в настоящей главе разработана методология определения фрактальной размерности гидрографической сети. Апробация методологии велась на бассейне р. Уфа. Определение фрактальной размерности производилось по изображениям карт разрешения 100 dpi для пяти масштабов: 1: 2 000 000, 1: 1 000 000, 1: 500 000, 1: 200 000 и 1:100 000. Оцифровка растрового изображения топографических карт производилась вручную. Далее с помощью ЦМР (цифровая модель рельефа) выделены границы водосборов для 9 водотоков бассейна р. Уфа: 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. Атияш, р. Юрюзань – д. Чулпан.

Определение фрактальной размерности речных сетей выполнялось с помощью 6 программ, находящихся в открытом доступе: FrakOut, HarFa, Frac, Imagej, Frac_Lac, QGIS. Сравнительный анализ особенностей (настроек) программ представлен в табл. 3. Знаки + / – обозначают, соответственно, достоинства / недостатки исследуемых программ.

Для устранения выделенных недостатков существующих программ (таблица 3) разработана программа для ЭВМ «Автоматизированный расчет фрактальной размерности» (АРФР). Основными отличиями АРФР от аналогов является ускоренная автоматическая обработка изображения, благодаря его предварительному индексированию, что значительно снижает трудоемкость расчета. Однако особенность расчетного алгоритма АРФР не позволяет изменять положение расчетной сетки, скорость расчета зависит от производительности ПК. Программа работает только с растровыми изображениями.

Таблица 3 – Сравнительный анализ программ определения фрактальной размерности

Программы, используемые для расчета фрактальной размерности методом box-counting	Автоматическая обработка изображения	Выбор размеров минимальной и максимальной ячеек не зависит 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 расчета	Количество «-» по каждой программе
FrakOut!	-	+	+	+	-	+	+	-	+	3
HarFa	+	-	-	-	-	+	-	-	+	6
Frac	+	-	-	-	-	-	-	-	-	8
Imagej	+	-	-	+	-	-	+	-	+	5
Frac_Lac	+	-	-	+	+	-	+	-	+	4
QGIS	+	+/-	+/-	+	-	-	-	+	+	3

В рамках настоящего исследования получено 675 значений фрактальных размерностей (9 водосборов в 5 масштабах, 7 программ (15 различных режимов)). Обоснование выбора программы и масштаба исследования выполнялись на основе статистической обработки данных.

Результатом проведенных исследований стали следующие методологические рекомендации:

- для расчета фрактальной размерности предлагается использовать растровое изображение водосборов разрешением 100 dpi;

- максимальным достаточным масштабом исследуемого водосбора является 1:200000;

- для минимизации субъективного фактора предлагается применять АРФР;

- при расчете расчетная сетка накладывается на прямую проекцию гидрографической сети без поворотов.

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.

Так как разбавление связано с показателем густоты речной сети, доля малых рек водосбора косвенно является качественной и количественной характеристикой водных объектов. Основываясь на фрактальной природе

речной сети, предложено (Сидорчук А.Ю., 2014) определять доли рек с длинами в заданном диапазоне (P):

$$P = \left(\left(\frac{\delta_1}{\delta_0} \right)^{1-D} - \left(\frac{\delta_2}{\delta_0} \right)^{1-D} \right) \cdot 100 \% \quad (3)$$

где P – соотношение рек с длинами заданного диапазона 1-100 км, %;

δ_1 – верхняя граница исследуемого диапазона 1 км;

δ_2 – нижняя граница исследуемого диапазона 100 км;

δ_0 – длина единичного измерительного отрезка 1 км;

D – фрактальная размерность водосбора.

По формуле 3 определялось соотношение рек с длинами диапазона 1-100 км известных по справочным данным для рек Уфа и Белая («Ресурсы поверхностных вод СССР» Том 11, «Основные гидрологические характеристики рек бассейна Кама»).

В таблице 4 представлены результаты расчета соотношения рек с длинами, принадлежащими диапазону 1-100 км (P), рассчитанные на основе фрактальной размерности водосборного бассейна (D), соотношение длин рек, известных по справочным данным ($P_{дейст.}$), а также величины относительных погрешностей ($\delta_{отн.}$) между P и $P_{дейст.}$

Таблица 4 – Расчетные (P) и действительные ($P_{дейст.}$) значения соотношения рек с длинами заданного диапазона (1-100 км), полученные на основе фрактальной размерности

Водосбор реки	D	δ_0	δ_1	δ_2	P, %	$P_{дейст.}$, %	$\pm \delta_{отн.}$, %
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, фрактальная размерность позволила определить долю малых рек в исследуемых водосборах с точностью до 3,3%. Установленная закономерность подтверждает фрактальную природу гидрографической сети и позволяет определять процентное соотношение рек заданного диапазона на основе фрактальной размерности в отсутствие справочных данных.

В целях снижения трудоемкости расчетов разработана программа для ЭВМ «Определение доли рек с длинами заданного диапазона на основе фрактальной размерности водосборного бассейна».

Оценка водности территории водосборного бассейна с использованием фрактальной размерности проводилась через определение коэффициента наводнения Θ (Сметанин В.И., Насонов А.Н., Жогин И.М., Цветков И.В.). Согласно методике, гидрографическая сеть р. Уфа в масштабе 1:200 000 покрывалась сеткой с размером ячейки в полградуса

(географические координаты). Площадь покрытия составила 29 квадратов. Для каждого i -ого участка с помощью программы АРФР рассчитывалась фрактальная размерность D_i .

На рисунке 4 представлено распределение значений фрактальной размерности водосбора р. Уфа и границы бассейнов ее основных притоков.

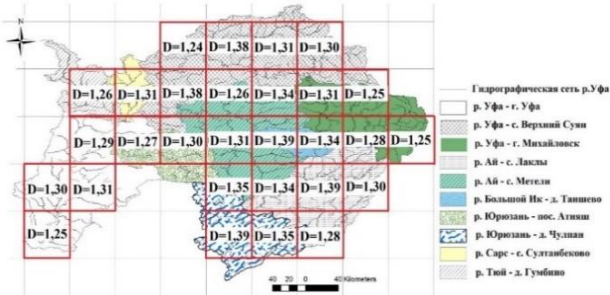


Рисунок 4 – Распределение фрактальной размерности речной сети по водосборной территории р. Уфа

Значения коэффициента наводнений Θ для каждого участка водосбора определялись по формуле 4

$$\Theta = (D_i - 1) / (D_2 - 1) \quad (4)$$

где, D_i – фрактальная размерность каждого i -ого участка
 D_2 – минимальное значение фрактальной размерности D_2 .

Полученные значения графически интерпретированы на рисунке 5.

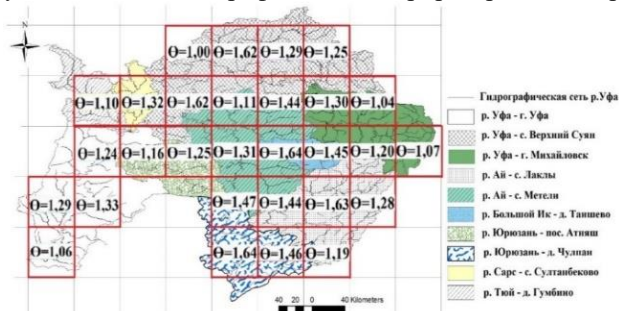


Рисунок 5 – Распределение коэффициента наводнений Θ по водосборной территории р. Уфа

Коэффициент наводнений неравномерно распределен по территории водосбора р. Уфа (рисунок 5). Наименьшие значения Θ отмечались в верховьях р. Уфа, р. Туй – д. Гумбино и р. Уфа вблизи устья. Наибольшие значения коэффициента наводнений характерны для водосборов с

замыкающими створами в р. Юрюзань – пос. Атнаш, р. Большой Ик, р. Ай и р. Уфа – с. Верхний Суян.

Установлена зависимость между фрактальной размерностью гидрографической сети и расходами воды в реках (рисунок 6).

Проверка адекватности и точности полученной математической зависимости показала, что относительная погрешность между действительным и расчетным значением расхода воды находится в пределах $\pm 12\%$.

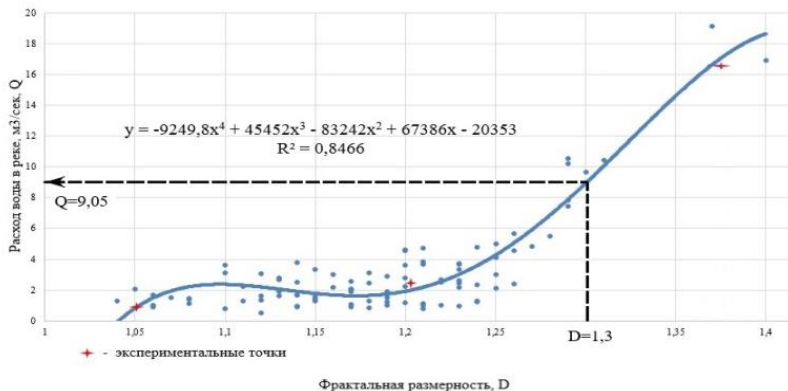


Рисунок 6 – Зависимость расходов воды в исследуемых реках Q от значений их фрактальной размерности D

Полученная зависимость позволяет определять расход воды в реках на основе значений фрактальной размерности (D), не проводя гидрометрических измерений.

Таким образом, фрактальная размерность является интегральным показателем состояния водного объекта, который можно использовать для определения доли малых рек на исследуемой водосборной территории, для определения коэффициента наводнений территории и расхода воды в реках.

Результат, выносимый на защиту: Методология определения фрактальной размерности гидрографической сети. Научно-техническое обоснование использования фрактальной размерности в качестве интегральной характеристики водосборной территории. Закономерность изменения фрактальной размерности гидрографической сети в зависимости от разветвленности речной сети, водности водосборной территории (коэффициента наводнений) и расходов воды в реках.

Пятая глава посвящена созданию геоинформационной системы для управления геоэкологическим риском муниципальных образований (МО) (на примере МО, расположенных на территории водосборного бассейна р. Уфа).

Геоэкологический риск характеризуется: загрязнением вод, истощением водных ресурсов, деградацией речной сети. При стандартном

подходе риск определяется как произведение вероятности возникновения нежелательного события и размера его последствий (ущерба). В настоящей работе расчет геоэкологического риска основывается на определении риска длительного (хронического) воздействия, разработанного Международным институтом оценки риска здоровью (А.В. Киселев, К.Б. Фридман).

Определение риска длительного (хронического) воздействия основано на использовании математических моделей: линейная или линейно-экспоненциальная модель.

$$Risk = 1 - \exp\left\{-Unit_{RiskC^Bt}\right\} \quad (4)$$

где $Risk$ – потенциальный риск;

$Unit_Risk$ – единица риска, определяемая как фактор пропорции роста риска в зависимости от величины действующей концентрации (дозы);

C – реальная концентрация (или доза) вещества, оказывающая воздействие за время t ;

B – коэффициент, учитывающий особенности токсических свойств вещества.

Для каждого МО рассчитывается геоэкологический риск по преобразованию формулы 5:

$$Risk_{cp} = 1 - \exp\left\{\frac{1}{2}\left[l_n(1 - Risk_{ист}) + l_n(1 - Risk_{загр})\right]\right\} \quad (5)$$

где $Risk_{загр}$, $Risk_{ист}$, – показатели риска истощения и загрязнения водных ресурсов.

Риск истощения определялся по формуле 6

$$Risk_{ист} = 1 - \exp\left\{\ln(0,84) \cdot K_{ист} \cdot K_n\right\} \quad (6)$$

$K_{ист}$ определяется по формуле 7.

$$K_{ист} = \frac{V_{пов} + V_{под}}{Q_{год ст} \cdot S_{вдс} \cdot K_{исп}} \quad (7)$$

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

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

$Q_{год ст}$ – среднемноголетний расход годового стока, м³/с;

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

$K_{исп}$ – поправочный коэффициент в зависимости от вида использования территории.

$V_{пов}$ и $V_{под}$ определялись по данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году» бытовое потребление на душу населения для каждого субъекта РФ, на территории которого расположен водосбор р. Уфа.

Средний многолетний расход для каждого МО определялся следующим образом:

1. Расчет модуля стока для каждой водосборной территории (отношение $Q_{\text{ер}}$ многолетнего стока к $S_{\text{вдс}}$).
2. Определение площадей водосборных бассейнов, находящихся в границах каждого МО.
3. Расчет произведения площадей водосборных бассейнов, находящихся в границах каждого МО, и модуля стока соответствующих бассейнов.
4. Определение $Q_{\text{год ст.}}$ поверхностных вод в каждом МО.

Таким образом, получены значения $Q_{\text{год ст.}}$ поверхностных вод на территории каждого МО.

Риск загрязнения определялся по формуле 8.

$$Risk_{\text{загр}} = 1 - \exp\left\{\ln(0,84) \cdot \text{УКИЗВ} \cdot K_3 \cdot K_{\text{зап}}\right\} \quad (8)$$

где УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязнения водотоков данные. Данные получены из Ежегодных государственных докладов о состоянии природных ресурсов и окружающей среды для каждого субъекта РФ, на территории которого расположен водосбор р. Уфа, а также УКИЗВ рассчитывался с использованием гидрохимических данных по методике РД 52.24.643-2002

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

K_3 – коэффициент загрязнения

Настоящая методика по оценке риска лежит в основе ГИС управления геоэкологическим риском. Архитектура разрабатываемой ГИС представлена на рисунке 7.

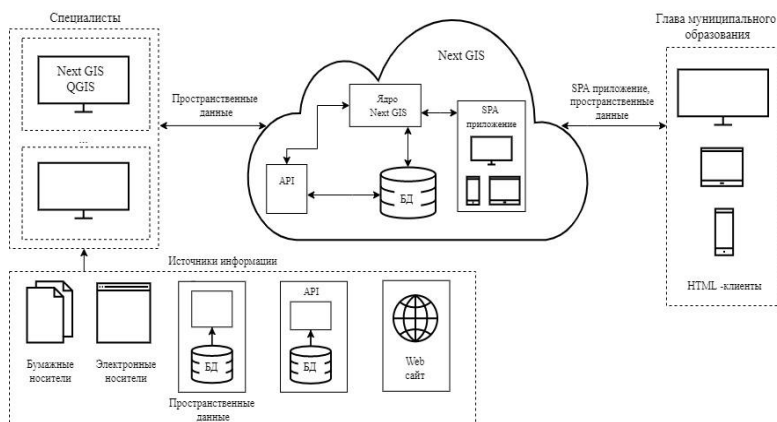


Рисунок 7 – Архитектура ГИС управления геоэкологическим риском (на примере водосборного бассейна р. Уфы)

Как видно по рисунку 7, 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.

Величина коэффициентов средневзвешенного риска ранжировалась: 0,0-0,25 – слабый; 0,25-0,50 – средний; 0,50-0,75 – сильный; 0,75-1,00 – очень сильный. Основные этапы определения геоэкологического риска на водосборной территории и выбора решения по его минимизации представлены на рисунке 8.

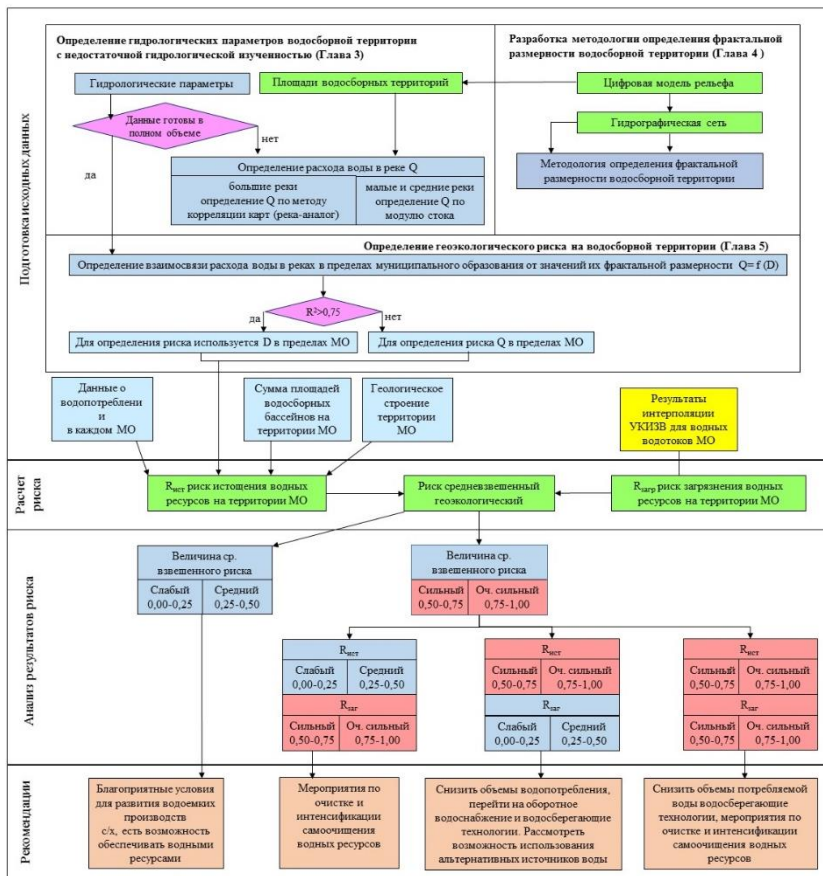


Рисунок 8 – Этапы принятия управленческих решений на основе анализа риска загрязнения и истощения водосборной территории

Величины коэффициентов риска являются основой для принятия решений по управлению водными ресурсами. Если величина

средневзвешенного риска превышает 0,5, это говорит о необходимости принятия решений для очистки воды или сокращения водопотребления из водного объекта.

Результаты, выносимые на защиту: Модель геоинформационной системы прогнозирования риска истощения и загрязнения водосборной территории на основе разнородных пространственных данных.

Выводы

1. Созданы базы данных характеристик исследуемой водосборной территории:

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

2. Разработана 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. Для расчета фрактальной размерности предлагается использовать растровое изображение водосборов разрешением 100 dpi. Максимальным и достаточным масштабом исследуемого водосбора является 1:200000. При расчете 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. Предложено использовать фрактальную размерность гидрографической сети как дополнительный источник информации при определении состояния водосборной территории.

4. Создана 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации:
статьи в журналах, индексируемых в Scopus:**

1. 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 Management, SGEM 2014 . (Bulgaria). – June 17-26, 2014. – Vol. 1. – P. 613-620.
2. 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.

**Работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях,
рекомендованных ВАК РФ:**

3. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Дубовик И.Е., Шарипова М.Ю., Белозерова Е.А. Оценка геоэкологического риска истощения пойменно-руслового комплекса с применением методов геоинформационного моделирования // Безопасность жизнедеятельности – 2014. – №11. – С. 3-7.
4. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Дубовик И.Е., Шарипова М.Ю., Белозерова Е.А. Изменение таксономической структуры сообществ водорослей экотонных при переходе от водной к наземной среде обитания // Безопасность жизнедеятельности – 2014. – №11. – С. 49-54.
5. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Белозерова Е.А. Восстановление пропущенных геоэкологических данных с помощью элементов искусственного интеллекта (на примере характеристик водосборного бассейна реки Белая) // Безопасность жизнедеятельности – 2014. – №11. – С. 55-59.
6. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Дубовик И.Е., Шарипова М.Ю., Белозерова Е.А. Эпифитные сообщества цианопрокариот и водорослей древесных растений г. Уфы и возможность их использования в биоиндикации // Безопасность жизнедеятельности – 2015. – №11. – С. 27-31.
7. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Дубовик И.Е., Шарипова М.Ю., Белозерова Е.А. Комплексная оценка качества воды реки Белая Республики Башкортостан // Безопасность жизнедеятельности – 2015. – №11. – С. 36-40.
8. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Тунакова Ю.А., Кузнецова О.Н., Белозерова Е.А. Использование малой гидроэнергетики как экологичного и энергоэффективного альтернативного источника энергии // Вестник Казанского технологического университета – 2015. – Т.18. – №18. – С. 234-237.
9. Тунакова Ю.А., Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Кузнецова О.Н., Белозерова Е.А. Разработка методики определения самоочищающей способности рек на основе фрактальной геометрии для установления

допустимого антропогенного воздействия // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т.18. – №19. – С. 249-254.

Иные публикации:

10. Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А. Методология определения фрактальной размерности водосборной территории // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета (Гидрометеорология и экология). – 2021. – С. 52-74.

11. Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А. Разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета (Гидрометеорология и экология). – 2021. – С. 702-725.

Базы данных и программы для ЭВМ:

1. Гидрохимические показатели р. Белая и ее притоков / Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А. и др. // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620517 от 31.03.2014.

2. Основные характеристики поймы р. Белая и ее основных притоков / Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А. и др. // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620523 от 02.04.2014.

3. Автоматизированный расчет фрактальной размерности / Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А. и др. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618323 от 14.08.2014.

4. Расчет геоэкологического риска количественного и качественного истощения водных ресурсов / Белозерова Е.А. и др. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014613153 от 19.03.2014

5. 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.

6. Моделирование расходов воды в реках на основе данных эталонного поста / Белозерова Е.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613375 от 14.03.2022.