

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова»

На правах рукописи

УДК 303.732.4; 004.942; 004.67

**Пономарёв Дмитрий Сергеевич**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ  
ДЕЗОДОРАЦИИ ПРИРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД НА  
ГОРОДСКИХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (в науке и технике)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор В. Г. Исаков

Ижевск 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ДЕЗОДОРАЦИИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....</b>	<b>11</b>
1.1. Системный анализ технологического процесса дезодорации поверхностных вод на городских сооружениях водоочистки .....	11
1.2. Причины ухудшения органолептических свойств питьевой воды в системах водоснабжения.....	25
1.3. Проблематика систем питьевого водоснабжения в условиях эвтрофированных источников воды и пути решения .....	30
1.4. Сорбционные методы дезодорации питьевой воды и применение ПАУ .....	39
1.5. Возможность применения моделирования к проблемам дезодорации в системе питьевого водоснабжения .....	42
Выводы по главе.....	46
<b>ГЛАВА 2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕГРЕССИОННАЯ СТАТИСТИКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ.....</b>	<b>48</b>
2.1. Предпосылки и возможность применения корреляционного анализа данных и регрессионной статистики для процесса дезодорации .....	49
2.2. Корреляционный анализ данных и регрессионная модель для основных параметров питьевой воды.....	51
2.3. Расход ПАУ относительно концентрации геосмина в системе питьевого водоснабжения.....	72
Выводы по главе.....	77
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ИНС ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ.....</b>	<b>79</b>
3.1. Обоснование применения ИНС глубокого обучения с сигмоидальной функцией активации к решению проблемы дезодорации воды.....	79

3.2. Разработка модели ИНС для основных значений параметров дезодорации воды .....	85
3.3 Результаты нейрорегрессии и достоверность результатов .....	99
Выводы по главе .....	108
<b>ГЛАВА 4. ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ДЛЯ ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ .....</b>	<b>109</b>
4.1. Проверка полученных результатов для основных значений параметров дезодорации в системе питьевого водоснабжения .....	109
4.2. Учет оседания частиц адсорбента при моделировании значений параметров дезодорации .....	115
4.3. Применение полученных результатов в качестве интеллектуальной системы поддержки принятия решений для технологического процесса дезодорации питьевой воды .....	121
4.4. Использование разработанных методик для рассматриваемой системы водоснабжения .....	125
Выводы по главе .....	126
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>128</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>130</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>131</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>145</b>
Приложение А .....	146
Приложение Б .....	153
Приложение В .....	156
Приложение Г .....	157
Приложение Д .....	159
Приложение Е .....	160
Приложение Ж .....	161
Приложение И .....	162

303.732.4 «Системный анализ»;

004.942 «Исследование поведения объекта на основе его математической модели»;

004.67 «Системы обработки численных данных».

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** На сегодняшний день на фоне увеличивающегося негативно-го антропогенного воздействия на окружающую среду наблюдается ухудшение состояния многих источников питьевого водоснабжения по широкому спектру показателей, в частности, таких как органолептические свойства воды. Как следствие, возникает проблема и для питьевой воды. Оптимальным решением является очистка воды порошкообразными активированными углями (ПАУ). Такой способ может быть использован на любых сооружениях водоподготовки. Однако применение ПАУ является исключительно дорогостоящим процессом, требующим значительных инвестиций.

На данный момент отсутствуют рекомендации по выбору параметров дезодорации, а именно марки активированного угля и его смесей, оптимального дозирования и выбора времени контакта в зависимости от параметров исходной воды. Таким образом, системный подход к решению данного вопроса является актуальным.

Проведение экспериментальных исследований дезодорации питьевой воды непосредственно на очистных сооружениях является довольно затратным процессом с необходимостью привлечения практически всех ресурсов предприятия и вероятностью нарушения водоснабжения города, что является недопустимым. Поэтому перспективным в данной области представляется проведение исследований на теоретическом уровне, а именно - разработка математической модели: это позволит сэкономить ресурсы, изучить процессы во времени с возможностью их прогнозирования, а так же выявить общие закономерности. Особый интерес представляет применение искусственной нейронной сети (ИНС): в отличие от линейных методов статистики она позволяет создать нелинейные зависимости и тем самым более точно описывать рассматриваемые процессы. Кроме того, нейронная сеть обучается на всей выборке, не фрагментируя её, что повышает точность результатов.

**Степень разработанности исследования.** Проблемы водоподготовки и рационального использования водных ресурсов рассматривались в работах Алексева В.А., Вайсмана Я.И., Исакова В.Г., Попова А.Н., Рудаковой Л.В., Юрана С.И. и др. Применение интеллектуальных и информационных систем рассматривались в работах Бельтюкова А.П., Габричидзе Т.Г., Горохова М.М., Зайцева В.А., Малиной О.В., Нистюка А.И., Поповой С.Н., Трусова В.А., Трусова А.В. и др. Автоматизация и управление системами, их моделирование рассматривались в работах Ефимова И.Н., Зориктуева В.Ц., Калача А.В., Корепанова М.А., Колодкина В.М., Коршунова А.И., Лютова А.Г., Муравьева В.В., Муравьевой О.В., Родиной Л.И., Турыгина Ю.В., Хворенкова В.В., Шелковникова Е.Ю. Компьютерное зрение, нейронные сети и системы распознавания образов рассматривались в работах Вологодина С.В., Куликова В.А., Лезиной И.В., Тененева В.А., Южакова А.А., Якимовича Б.А. и др.

Вопросами дезодорации воды занимаются практически все предприятия водоснабжения и водоподготовки, научно-исследовательские институты и образовательные учреждения (МУП «Ижводоканал» и СПО «Пруд-Ижевск»; АО «Мосводоканал»; МУП «Пермводоканал»; «Мосводоканал НИИпроект»; РосНИИВХ; НИИ «Водгео» и др.). Вопросы применения ИНС и разработкой интеллектуальных систем на сегодняшний день занимаются Санкт-Петербургский Математический институт имени В.А. Стеклова РАН; лаборатория нейронных систем и глубокого обучения МФТИ; кафедра «Автоматика и телемеханика» ПНИПУ; Институт компьютерных технологий и защиты информации КНИТУ; кафедра «Информационные системы» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова; кафедра «Безопасность информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну» Воронежского института ФСИН России и др.

**Область исследования.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами 3. «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», 5. «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, при-

нятия решений и обработки информации», 8. «Теоретико-множественный и теоретико-информационный анализ сложных систем», 10. «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах» паспорта специальности 05.13.01 - «Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике)».

**Объектом исследования** является технологический процесс дезодорации природных поверхностных вод на городских очистных сооружениях.

**Предмет исследования** является интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления технологическим процессом дезодорации предварительно очищенной воды.

**Целью диссертационного исследования** является разработка модели управления технологическим процессом дезодорации поверхностных вод на городских очистных сооружениях в условиях поверхностных водоисточников. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ проблемы очистки и дезодорации воды на городских сооружениях и путей ее решения в условиях эвтрофированных водоисточников.
2. Реализовать корреляционный анализ данных для значений показателей исходной и питьевой воды и разработать регрессионную модель на его основе для процесса дезодорации воды.
3. Разработать модели поведения основных параметров дезодорации воды с использованием нейронных сетей глубокого обучения.
4. Проверить адекватность полученных результатов и возможность их применения в качестве инструмента улучшения технологического процесса дезодорации питьевой воды.

#### **Научная новизна**

1. Выявлены корреляционные зависимости численных значений параметров исходной и питьевой воды в системах водоочистки при проведении процесса дезодорации. На основе полученных результатов разработана методика, позволяю-

шая определить эффективность технологической схемы предприятия в области дезодорации воды.

2. Разработаны регрессионные модели, позволяющие определить значения параметров питьевой воды исходя из качества исходной на городских очистных сооружениях в условиях эвтрофированных водоисточников.

3. Разработана модель управления технологическим процессом дезодорации питьевой воды, базирующаяся на применении искусственных нейронных сетей глубокого обучения.

4. Предложена методика, позволяющая адаптировать систему водоочистки к изменяющимся параметрам источников питьевого водоснабжения, базирующаяся на нейрорегрессионном моделировании.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработана методика, которая позволяет выявить связь между значениями исходной и питьевой воды в области дезодорации. Применение данной методики позволит более точно определить недостатки технологических схем на предприятиях водоподготовки в области удаления ароматических соединений.

2. Разработанная модель позволит спрогнозировать изменения концентраций ароматических соединений (таких как геосмин, хлороформ, хлориды) в питьевой воде, исходя из качества исходной воды (если существует связь между параметрами).

3. Разработанная при помощи ИНС модель позволит более точно определить параметры (дозирование, время контакта, адсорбционную активность) технологического процесса дезодорации питьевой воды

4. Разработана методика, позволяющая адаптировать систему водоочистки к изменяющимся параметрам источников питьевого водоснабжения. Применение данной методики позволит выбрать правильное соотношение марок активированного угля; позволит сократить остатки, которые присутствуют после сезонной очистки т.к. благодаря скорректированным значениям определены параметры дезодорации.



Разработанные научно-методические основы были использованы при выполнении НИР по договорам ВиВ-1-14/С и ВиВ-2-15/С для МУП «Ижводоканал».

**Методы исследования.** В решении задач использовались методы системного анализа - применены статистические методы и методы моделирования: корреляционный, дисперсионный, регрессионный анализ, построение и обучение искусственных нейронных сетей; использовались физико-химические уравнения.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная методика, позволяющая провести теоретико-информационный анализ технологической схемы систем водоочистки и выявить связь между значениями исходной и питьевой воды в области дезодорации.

2. Модель, позволяющая определить значения показателей питьевой воды (таких как концентрации геосмина, хлороформа, хлоридов) исходя из качества исходной воды в условиях эвтрофированных водоисточников .

3. Разработанная при помощи ИНС глубинного обучения модель и алгоритм управления технологическим процессом дезодорации питьевой воды.

4. Разработанная методика, позволяющая адаптировать систему водоочистки к изменяющимся параметрам источников питьевого водоснабжения, базирующаяся на нейрорегрессионном моделировании.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается применением в работе научно-обоснованных методов экспериментальных и теоретических исследований; корректностью использования физико-химических законов; применением теоретически обоснованных методов системного анализа сложных прикладных объектов исследования, включая вопросы анализа, моделирования, оптимизации, совершенствования принятия решений.

**Публикация результатов.** Результаты исследований отражены в 24 работах, в том числе 5 статей [13, 116-119] опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК; 1 патент на изобретение [111]; 1 статья в сборнике конференции, включенном в базу *Web of Science* [42]; 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [112-115]. В статье [118] соискателю принадлежит разработка нейрорегрессионной мо-

дели дезодорации воды на основе многослойного персептрона. В статьях [116, 117] соискателю принадлежит разработанная регрессионная модель значений концентрации геосмина в питьевой воде. В работах [111-115] соискателю принадлежат разработанная модель оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме и модель значений концентраций одорирующих веществ в питьевой воде. Остальные результаты в работах по теме диссертационного исследования принадлежат соавторам.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях и семинарах: V International research and practice conference (Канада, Вествуд, 2014 год); The 1<sup>st</sup> International Academic Conference (Австралия, Мельбурн, 2014 год); Международная научно-практическая конференция по проблемам экологического образования МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 2013 год); Вторая Всероссийская научно-практическая конференция (Саратов, 2013 год); Пятая Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (Уфа, 2015 год); Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Томск, 2015); Вторая научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых (Ижевск, 2013 год); Третья Региональная научно-практическая экологическая конференция преподавателей и студентов (Ижевск, 2013 год); Третья Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием (Ижевск, 2015 год).

**Личный вклад** состоит в постановке и реализации задач на всех этапах исследования, подготовке основных публикаций по выполненной работе, непосредственном участии в разработке изобретения (патент №2559561 RU) и программ для ЭВМ (свидетельства №2014662091 RU, №2015619352 RU, №2015661214 RU, №2015661548 RU) по теме диссертационного исследования.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 144 страницах и содержит 52 рисунка, 40 таблиц, 8 приложений, библиографические ссылки из 155 наименований.

## **ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ДЕЗОДОРАЦИИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

### **1.1. Системный анализ технологического процесса дезодорации поверхностных вод на городских сооружениях водоочистки**

Одной из актуальных проблем последних десятилетий в области водоподготовки является необходимость дезодорации питьевой воды. Ухудшение качества природных вод обусловлено их минеральным и органическим составом [142]. Нежелательные ароматические свойства вызываются неорганическими соединениями и органическими веществами естественного и искусственного происхождения.

Присутствие в природной воде растворенных органических веществ биологического происхождения является результатом процессов разложения и последующей трансформации отмерших высших водных растений, планктонных и бентосных организмов, различных бактерий и грибов. При этом в воду выделяется большое количество низкомолекулярных спиртов, карбоновых кислот, оксикислот, кетонов, альдегидов, фенолсодержащих веществ обладающих сильными ароматическими свойствами [142].

Перспективным решением данной проблемы стало применение методов дезодорации с использованием адсорбентов, например, таких как активированный уголь: методы углевания воды представляют собой эффективное решение для очистки питьевой воды от одорирующих веществ [83, 15], тем самым улучшая ее органолептические свойства. Однако данная область малоизучена, поэтому особое значение в свете новых задач приобретает разработка методов математического моделирования, позволяющих на теоретическом уровне, на основании проанализированных данных, рассчитать значения процессов улучшения ароматических свойств при обработке природных вод, тем самым оптимизировать и повысить эффективность очистки питьевой воды, сократить расход адсорбента, а так же его остаток после сезонной очистки.

Для проведения системного анализа следует в первую очередь рассмотреть пошаговую инструкцию очистки воды, основные узлы на станции подготовки воды (СПВ) «Пруд-Ижевск» [4]. Технологическая схема подготовки воды на СПВ «Пруд-Ижевск» представлена на рисунке 1.1. [4, 130]

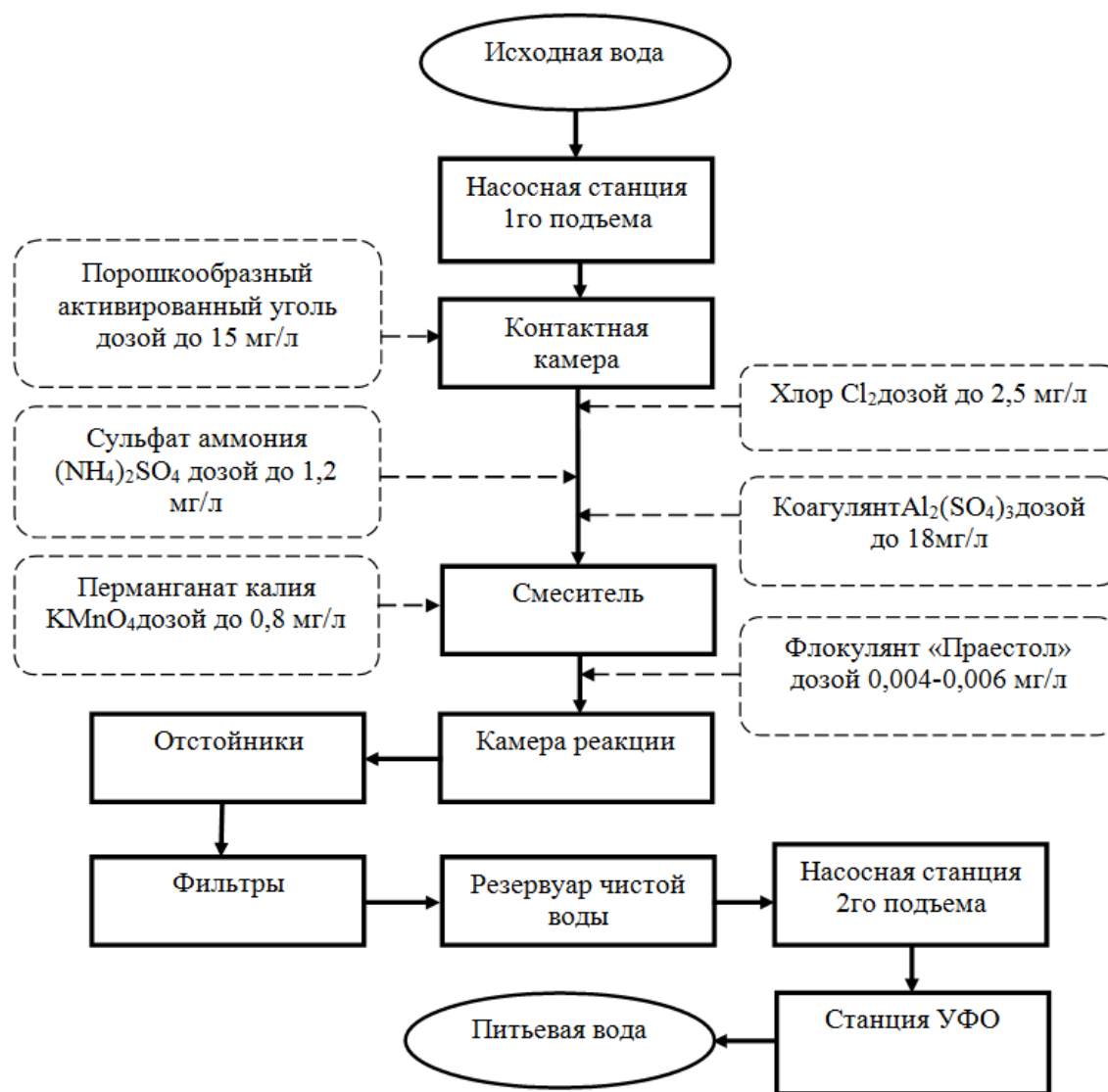


Рисунок 1.1 – Технологическая схема подготовки воды на СПВ «Пруд-Ижевск»

**1. Насосная станция первого подъема.** Применяется для забора воды из Ижевского водохранилища.

**2. Смеситель (вертикальный, гидравлического типа).** Представляет собой резервуар, в котором перемешиваются реагенты, применяется для равномер-

ного их распределения. Добавление реагентов (с затратами на примере 2014 года) [138]:

- Хлор (при цене 80 рублей/кг). Средний годовой расход составил 80 тонн. Затраты 6 400 000 рублей в год.
- Флокулянт («Праестол 650TR»). При стоимости 200 рублей/кг и расходе 5 тонн/год затраты составляют 1 000 000 рублей в год.
- Коагулянт (сульфат алюминия 20 рублей/кг). При расходе 10 тонн затраты около 200 000 рублей в год
- Перманганат калия (при цене 800 рублей/кг). При расходе 6 тонн затраты 4 800 000 рублей в год
- Сульфат аммония (при цене 20 рублей/кг). При расходе 40 тонн затраты 800 000 рублей в год
- Активированный уголь. (при цене 85 рублей/кг). При расходе 50 тонн затраты 4 250 000 рублей в год

**3. Горизонтальный отстойник со встроенной камерой хлопьеобразования.** Представляет собой резервуар, в котором отстаивается вода. Вода движется самотеком, затраты только на ремонт.

**4. Фильтры.** Фильтрация воды путем ее пропускания через слой загрузки (т.е. через слой гальки, песка). Вода движется самотеком, затраты только на ремонт и промывку фильтра.

**5. Резервуар чистой воды (РЧВ).** Представляет собой резервуар для накопления воды для стабильной, постоянной подачи в город к потребителям.

**6. Насосная станция второго подъема** (при средней цене для предприятий 2 рубля за кВт, расходе электроэнергии на работу насосов 600 кВт час на 1000м<sup>3</sup> для двух станций первого и второго подъемов ). При обработке воды от 30 000 до 67 000 в сутки расходы на затрату электроэнергии могут составлять от 13 000 000 до 30 000 000 рублей в год. [138]

**7. Питьевая вода в город.** Затраты на ремонт и обслуживание сети трубопроводов.

В графическом виде пошаговая инструкция очистки воды, основные узлы на станции подготовки воды (СПВ) «Пруд-Ижевск» с учетом средних денежных расходов представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Пошаговая схема очистки воды на станции подготовки воды (СПВ) «Пруд-Ижевск» со средней стоимостью каждого этапа, без учета затрат на ремонт узлов.

**Тариф на холодное водоснабжение с 1.07.2017 года составил 18 рублей 16 копеек за 1 куб. метр (рост цены на 30 % по сравнению с предыдущим годом) [155], что подтверждает актуальность применения методов моделирования к решению проблем рационального использования ресурсов предприятия (в частности, особую роль здесь стоит уделить реагентному хозяйству, как наиболее денежно-затратному, почти 25% от общего реагентного хозяйства). Перспективным для водоснабжения является рационализация использования ресурсов предприятия (грамотный расход и закупка реагентов) и применение наиболее выгодных**

технологических схем, производящих очистку воды в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01. В таблице 1.1 и на рисунке 1.3 отражена динамика изменения тарифов на водоснабжение за последние 10 лет [155].

Таблица 1.1 – Динамика изменения тарифов на водоснабжение, рублей/м<sup>3</sup>

Показатель	Год										
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Водоснабжение для населения, рублей/м <sup>3</sup>	3,8	4,2	5,0	6,2	7,2	8,6	10,3	11,6	12,6	12,9	18,1



Рисунок 1.3 – Динамика изменения тарифов на водоснабжение, рублей/м<sup>3</sup> с 2006 по 2017 год

Очистка воды на станции водоподготовки производится по двухступенчатой схеме, предусматривающей осветление в вертикальных и горизонтальных отстойниках и фильтрацию на скорых фильтрах с применением реагентной обработки воды [4, 75]. Состав элементов, взаимодействие в системе водоснабжения с учетом внешних факторов (таких например как система требований потребителей и экономические возможности) представлены на рисунке 1.4.

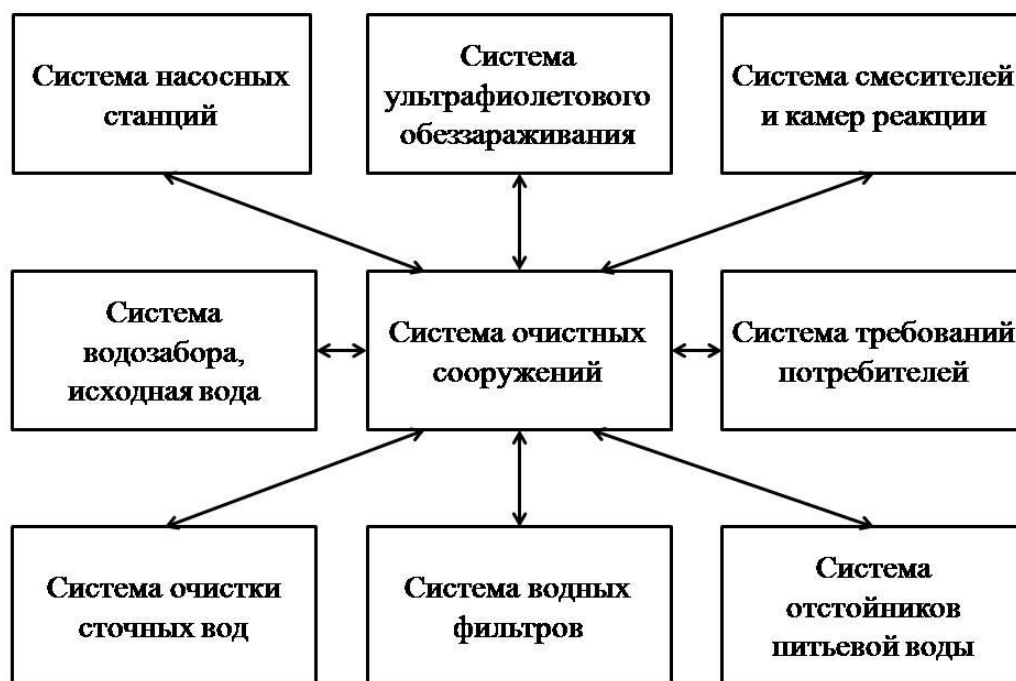


Рисунок 1.4 – Взаимодействие в системе водоснабжения с учетом внешних факторов.

При этом следует рассмотреть более подробно основные узлы системы водоснабжения [4, 75, 89].

**1. Исходная вода** – вода Ижевского водохранилища. Осуществляется водозаборными узлами (ВУ-1, ВУ-2, ВУ-3) станции подготовки воды "Пруд-Ижевск". Водозаборы расположены на левом берегу Ижевского пруда, в 25 метрах от кромки берегового откоса. По самотечному водоводу прудовая вода поступает в насосную станцию 1-го подъема [139].

**2. Насосная станция 1-ого подъема.** Подземная часть - круглый опускной колодец диаметром 21 метр, глубиной 11,37 метр из монолитного железобетона [138], наземная часть кирпичная, в машинном отделении установлено пять насосов. Насосами вода перекачивается в смеситель.

**3. Смеситель.** В смесителе происходит равномерное распределение реагентов в массе обрабатываемой воды, что способствует более благоприятному протеканию последующих реакций, происходящих затем в камере реакции. В данном случае используется смеситель с вертикальными перегородками и систе-



мой аэрации (насыщение воды кислородом) объемом  $157 \text{ м}^3$ , время смешения 1,5-2 мин [138];

**4. Камера реакции.** В камере реакции в результате взаимодействия реагента с солями, растворенными в воде, протекает процесс хлопьеобразования и осаждения взвесей на хлопьях. В данном случае работают две горизонтально-перегородчатые камеры реакции объемом  $315 \text{ м}^3$  [138];

**5. Отстойники.** Отстойники применяются для осаждения взвешенных частиц в воде, отстаивания воды после обработки реагентами. В технологической схеме используются два четырехсекционных горизонтальных отстойника объемом  $2800 \text{ м}^3$ ; шесть односекционных горизонтальных отстойников объемом  $1188 \text{ м}^3$ , со встроенными камерами реакции [138, 139]. На рисунке 1.5 представлена схема горизонтального отстойника.

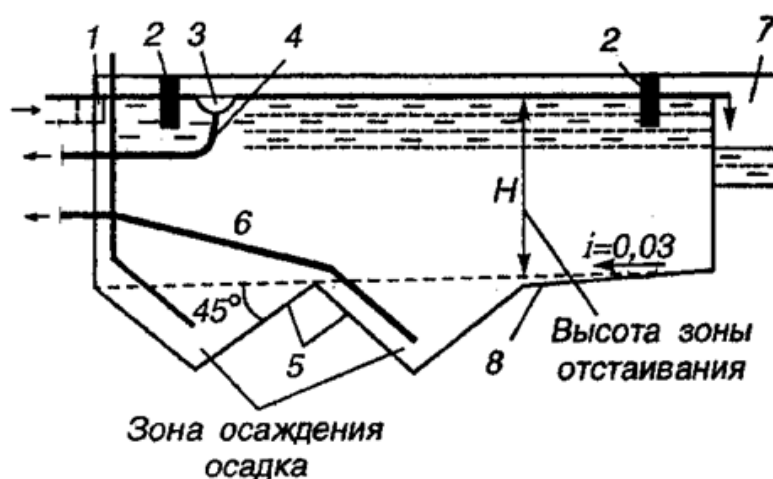


Рисунок 1.5 – Схема работы горизонтального отстойника. 1 – входной лоток; 2 – полупогружные перегородки; 3 – лоток для сбора жира и плавающих взвесей; 4 – труба для отвода жира и плавающих взвесей (жировая труба); 5 – пряжки для сбора осадка; 6 – труба для удаления осадка; 7 – сборный лоток для отвода осветленной воды; 8 – днище отстойника.

**6. Фильтры.** Используются для фильтрации воды, 14 фильтров (скорость потока от 6 до 12 метров в час) с дренажем большого сопротивления. На рисунке 1.6 представлена схема работы фильтров.

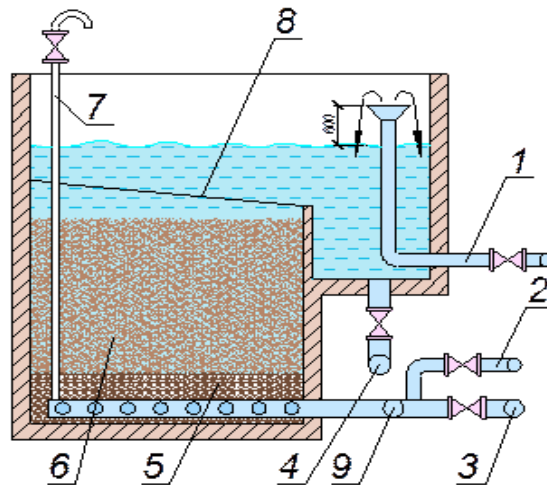


Рисунок 1.6 – Схема работы фильтра. 1 – подача исходной воды; 2 – отвод фильтрата; 3 – подача промывной воды; 4 – отвод промывной воды; 5- поддерживающие слои фильтра; 6- фильтрующий материал; 7 – воздушник; 8 – желоб; 9 – трубопровод опорожнения.

**7. Резервуары чистой воды.** Резервуары чистой воды применяются для равномерной и стабильной подачи воды потребителю. На СПВ «Пруд-Ижевск» стоят два резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup>; [138, 139].

**8. Насосная станция второго подъема.** Применяется для забора воды из резервуаров с чистой водой и доставки до потребителя через разводящую сеть.

**9. Станция УФО.** Применяется для обеззараживания воды ультрафиолетом. Введена в качестве испытательно-экспериментальной установки для выявления дополнительных возможностей обеззараживания воды. Вода пропускается через ультрафиолетовые бактерицидные лампы.

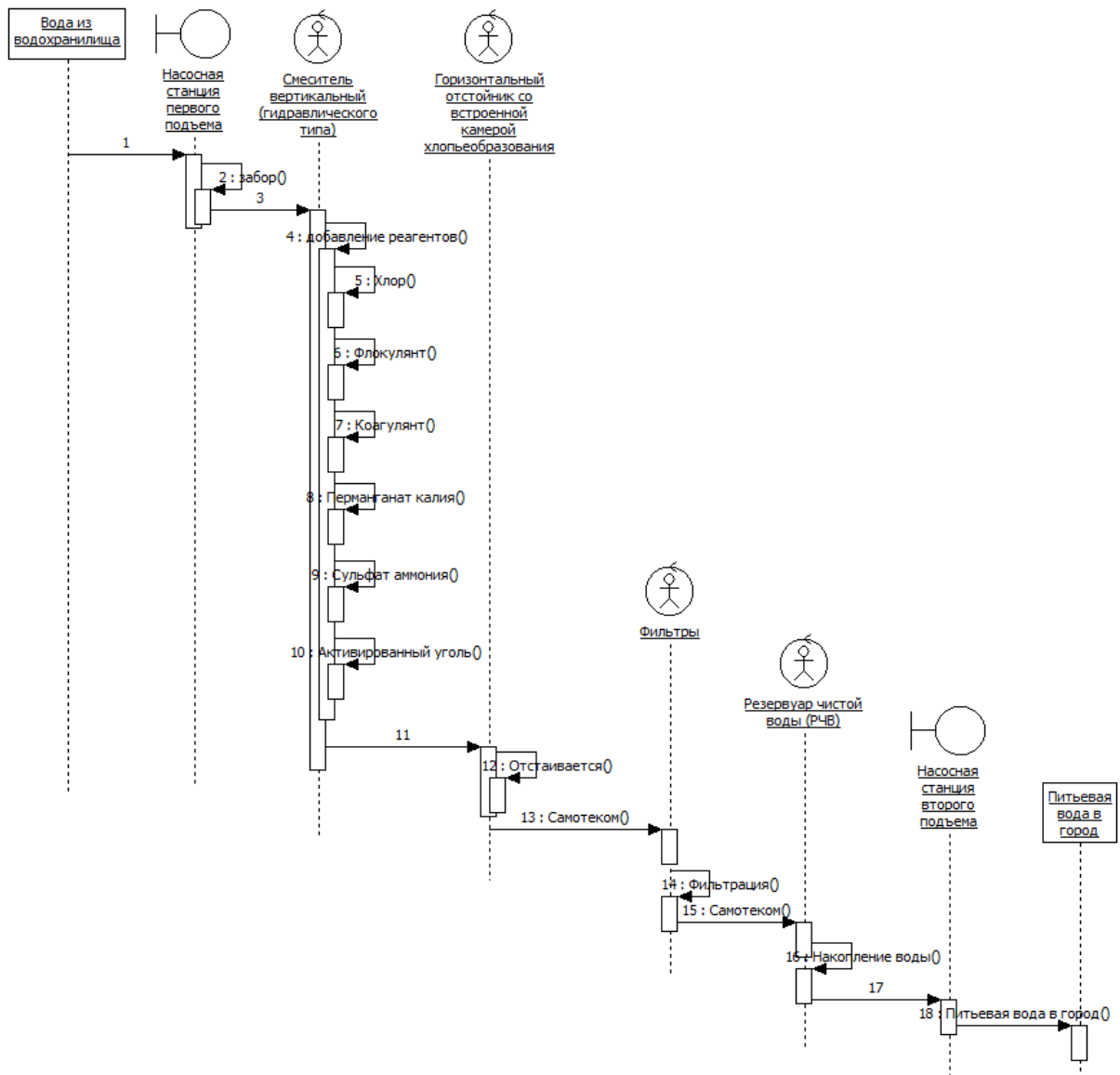


Рисунок 1.7 – UML- диаграмма последовательностей

На рисунке 1.7 представлена диаграмма последовательностей. Взаимодействие вышеперечисленных узлов принципиальной технологической схемы подготовки воды на СПВ «Пруд-Ижевск» можно рассмотреть с позиции системного анализа. При этом узлы будут являться подсистемами, которые взаимодействуют между собой и на которые оказывают воздействие внешние системы:

- система потребительских факторов (в первую очередь следует отметить нормативы [43, 124];

- система экономических факторов (особенно важным моментом здесь будет являться учет расходов на закупку реагентов, таких например как активированный уголь);
- система законодательных и нормативных факторов для питьевой воды и для систем водоснабжения в целом [43-45, 124];
- система требований к очистке сточных вод;
- система условий, создающих качество исходной воды (здесь следует отметить поверхностные источники для питьевой воды, внешние выбросы и сбросы вредных веществ в окружающую среду, климатические условия).

Взаимодействие вышеперечисленных узлов системы водоснабжения и внешнее воздействие на них с позиции системного анализа представлены на рисунке 1.8.

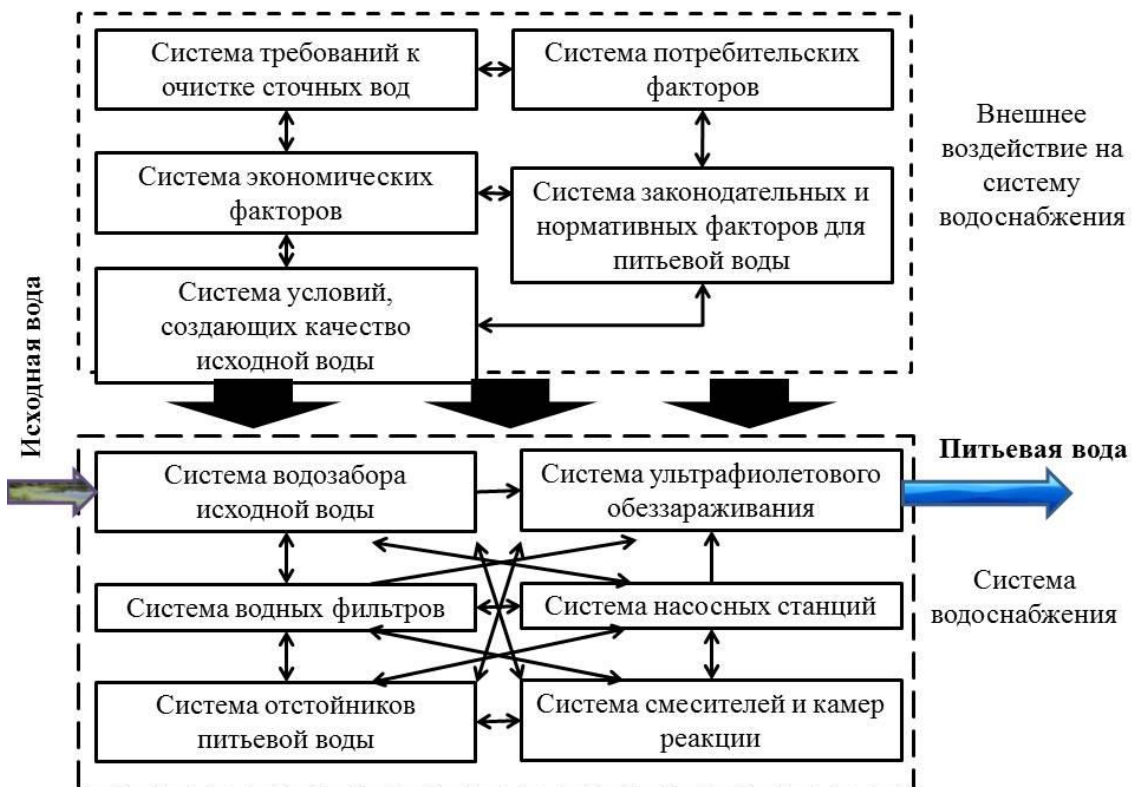


Рисунок 1.8 – Система водоснабжения. Внутреннее взаимодействие и внешнее воздействие

Следует рассмотреть более подробно каждый узел как подсистему, которая состоит из элементов, имеет внешнее воздействие и взаимодействие с другими системами. Так, например, система смесителей и камер реакции воды и реагентов будет состоять:

- из подсистемы хлорирования,
- из подсистемы углевания воды,
- из подсистемы смешивания флокулянтов и коагулянтов.

Подсистема углевания воды будет состоять из таких элементов как показатели исходной воды, показатели питьевой воды, параметры сорбента (в данном случае активированного угля различных марок), показатели окружающей среды (температурный режим, сбросы вредных веществ в окружающую среду). К внешним факторам воздействия на рассматриваемую подсистему можно отнести системы: потребительских факторов [43, 124]; экономических факторов; условий, которые создают качество исходной воды; законодательных и нормативных факторов [44, 45]. Взаимодействие вышеперечисленных узлов, подсистем и систем, внешних воздействий представлено на рисунке 1.9.



- **Флокулянт «Праестол»** применяется после коагулянта (который связывает в хлопья взвешенные частицы). Флокулянт производит объединение хлопьев в большие образования и выпадение их в осадок. Выпавший осадок чаще всего удаляется механическим способом.
- **Перманганат калия  $\text{KMnO}_4$**  – применяется для нормализации кислотности воды (рН).

На рисунке 1.10 представлена схема применения реагентов и их роль в определенном процессе обработки воды при водоподготовке.



Рисунок 1.10 – Применение реагентов на очистных сооружениях

Следует рассмотреть системный эффект производимый при взаимодействии нескольких реагентов. При совместном применении озонирования и углевания воды снижается расход озона и активированного угля в 2-5 раза, при этом каче-

ство воды не ухудшается и соответствует нормам ГОСТ Р ИСО 24512-2009 и СанПиН 2.1.4.1074-01 [87, 88]. Для расхода реагентов, таких как хлор и активированный уголь, можно тоже наблюдать проявление системного эффекта (рисунок 1.11, 1.12) [87].

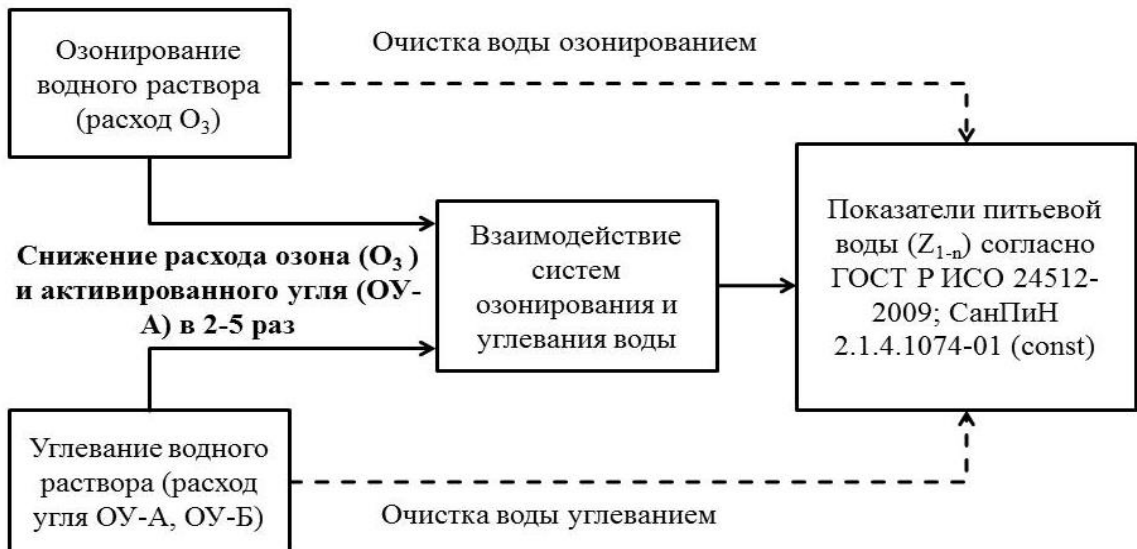


Рисунок 1.11 – Проявление системного эффекта для очистки воды и снижение реагентов с учетом ГОСТ Р ИСО 24512-2009 и СанПиН 2.1.4.1074-01

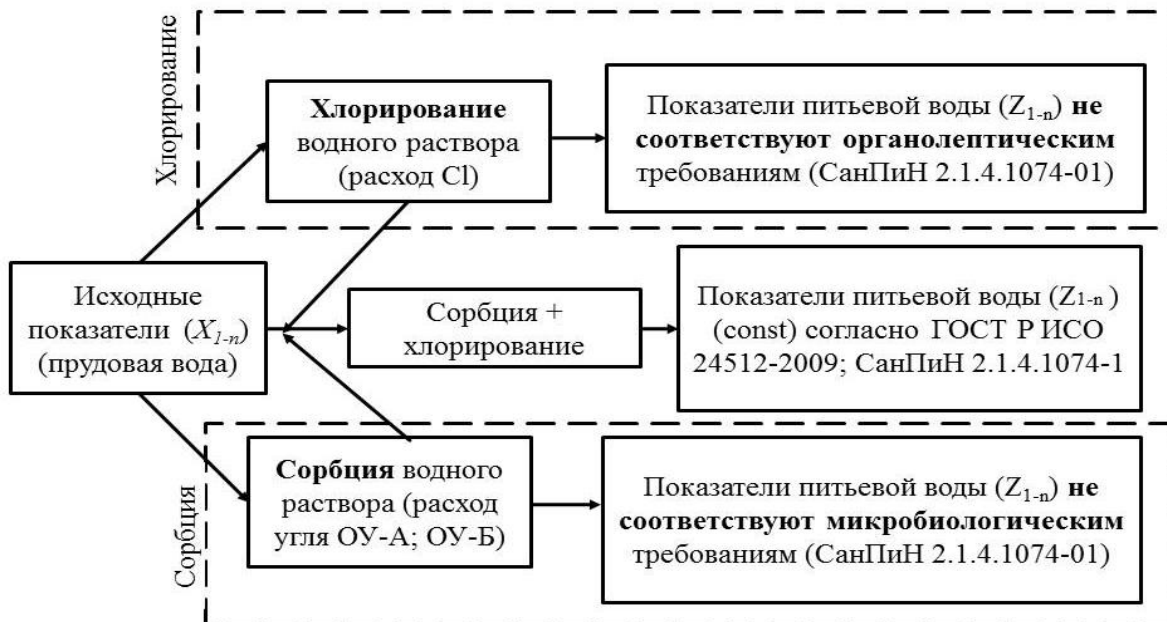


Рисунок 1.12 – Проявление системного эффекта для показателей питьевой воды и взаимодействия способов очистки на примере хлорирования и сорбции водного раствора активированным углем марок ОУ-А и ОУ-Б



Можно сказать, что в сложившейся экономической и практической ситуации рассматриваемого предприятия системный анализ технологического процесса очистки поверхностных вод является особенно актуальным.

## **1.2. Причины ухудшения ароматических свойств питьевой воды в системах водоснабжения**

Поверхностные источники питьевой воды, особенно те которые являются резервуарами, часто имеют проблемы в области органолептических свойств, обусловленного факторами присутствия актиномицетов и водорослей. Также источниками одорирующих веществ могут являться простейшие, грибы и другая водная микробиота [79, 149]. Органолептические свойства в питьевой воде могут описываться по-разному: рыбные, землистые, плесневые, деревянистые, затхлые.

Несколько видов водорослей хорошо известны как выраженные продуценты специфических органолептических свойств воды, в то время как большинство других видов вносят свой вклад лишь при определенных условиях. Определенные диатомовые, сине-зеленые и жгутиковые водоросли оказывают наибольшее влияние на одорирующие свойства воды [69]. Зеленые водоросли также могут вносить свой вклад в ухудшение ароматических свойств воды.

Потенциальные потребители питьевой воды – все население города Ижевска, более 600 000 человек (за исключением потребителей которые покупают воду, либо пользуются скважинами - но их по сравнению с населением города очень мало). Около 50% водоснабжения города Ижевск приходится на станцию подготовки воды «Пруд-Ижевск», производительность которой 127,0 тыс. м<sup>3</sup> /сут. В среднем жители Ижевска потребляют до 250 тыс. тыс. м<sup>3</sup> /сут.

Антропогенные источники органолептических показателей в питьевой воде многочисленны и разнообразны, но в большинстве случаев происходят от промышленных сточных вод, спущенных в водоемы ненадлежащим образом. Хлорирование воды на станциях водоподготовки часто ухудшает ароматические свой-

ства. Например, хлорирование воды содержащей фенол ( $C_6H_5OH$ ) приводит к образованию ряда хлорфенолов, которые проявляют органолептические свойства в микроконцентрациях, сами же фенолы не являются столь сильными органолептиками [69].

Превышение норм для органолептических показателей как результат процесса водоподготовки появляется при обработке воды окислителями, такими как хлор и озон [1, 7]. Сам по себе хлор и его соединения типа гипохлоритов придают воде специфические органолептические свойства; также, формируются побочные продукты дезинфекции – хлорфенолы, продукты реакции хлора и фенолов. Хлорфенолы имеют экстремально низкий порог обонятельной концентрации, в отличие от самих фенолов.

Неприятный вкус питьевой воде часто придают растворенные неорганические компоненты. Эти компоненты могут придавать воде минеральный, горьковатый или металлический привкус. Продукты коррозии железных и медных труб наделяют воду горьковато-железным привкусом.

Наиболее часто ухудшение питьевой воды выражается в характерных земляных и плесневелых проявлениях органолептических свойств, что связано с такими соединениями как геосмин и 2-метилизоборнеол, которые являются продуктами жизнедеятельности целого ряда микроорганизмов: актиномицетов, цианобактерий, а также многих видов водорослей [1, 2, 9].

Ухудшение ароматических свойств питьевой воды могут появиться на трех этапах:

- 1) из источника воды;
- 2) в процессе водоподготовки;
- 3) в процессе водораспределения.

**Источник воды.** Ароматические вещества поступают в поверхностные воды со сбросами городских и производственных сточных вод и продуцируются водными организмами. Наличие в исходной воде органики и соединений естественного происхождения является последствием процесса распада отмерших растений, водорослей, планктона, бактерий и грибов. Исходя из этого, в воду мо-

гут выделяться ароматические соединения, влияющие на органолептические свойства [9]. Многие плесени и лучистые грибки (например, актиномицеты) также вызывают проявление негативных органолептических свойств естественного происхождения, которые являются сложными смесями ароматических углеводов и кислородсодержащих соединений [18]. В продуктах распада водорослей содержание фенола в 20-30 раз превышает ПДК (0,001 мг/л) [9]. Сброс промышленных и городских сточных вод в поверхностные водоемы приводит к их загрязнению минеральными и органическими соединениями. Среди них соли тяжелых металлов, нефть и нефтепродукты, синтетические алифатические спирты, полифенолы, кислоты, пестициды, СПАВ.

Иногда органолептические свойства воды ухудшаются при передозировке реагентов или в результате неправильной эксплуатации водоочистных сооружений. Так, при хлорировании воды наблюдается ухудшение ее органолептических показателей как при нарушении режима процесса, так и в результате образования хлорорганических соединений [6, 7, 3]. Присутствующее в воде железо является катализатором дохлорирования фенолов, переводя малотоксичные диоксины в высокотоксичные при хлорировании воды. Органические вещества, присутствующие в воде, практически беспрепятственно проходят через загрузку скорых фильтров, в том числе и их токсичная диоксинсодержащая часть [7]. При обработке воды озоном могут появляться одоранты – алифатические альдегиды, имеющие проявление в виде фруктовых или цитрусовых ароматических свойств [92].

**Водораспределение.** Ухудшение органолептических свойств воды может возникнуть в распределительной сети в результате выделения органических соединений из защитных покрытий, которые могут выделять ароматические углеводороды (например, битумное покрытие выделяет нафталин). Кроме того, ухудшение ароматических свойств в сети может появиться вследствие развития микроорганизмов, продуцирующих метаболиты, которые являются источником землистых или затхлых органолептических показателей воды [4, 12]. Ухудшение органолептических свойств может возникнуть из-за железобактерий и серных бактерий. Железобактериями иногда приписывают нефтяные органолептические свойства,

особенно заметные утром или после длительного перерыва в использовании водопровода [6, 3].

**Анализ органолептических свойств.** Основной способ оценки содержания одорантов в воде – органолептический, который зачастую оказывается чувствительнее химико-аналитических. Также используются подходы определения кратности разведения до порогового уровня ощущения ароматических свойств или кратность порогового разведения «КПР», анализ «пахучести», испытание приоритетности [10, 101]. Определение ароматических свойств проводится органолептически при температуре воды 20 °С и 60 °С с качественной и количественной оценкой параметров [8, 16]. Для определения ароматических свойств в полевых условиях наполняют исследуемой водой примерно 3/4 пробирки, нагревают ее и закрывают корковой пробкой [44, 45]. После кратковременного взбалтывания открывают пробку и определяют ароматические свойства. Характер органолептических свойств выражают описательно: отсутствие, сероводородные, болотные, гнилостные, плесневые [11, 46, 58]. Интенсивность органолептических свойств оценивают по шкале, приведенной в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Шкала проявления органолептических свойств питьевой воды в баллах

Интенсивность	Характер проявления органолептических свойств	Оценка интенсивности, балл
Нет	Не ощущаются	0
Очень слабая	Не ощущается потребителем, но обнаруживается	1
Слабая	Замечаются потребителем, если обратить на это внимание	2
Заметная	Легко замечаются и вызывают неодобрительный отзыв о воде	3
Отчетливая	Обращают на себя внимание и заставляют воздержаться от питья	4
Очень сильная	Настолько сильные, что делают воду непригодной к употреблению	5

Органические вещества способствуют развитию микроорганизмов, выделяющих во внешнюю среду сероводород, аммиак, органические сульфиды, меркаптаны. Интенсивное развитие и отмирание водорослей способствует появлению в воде полисахаридов; щавелевой, винной и лимонной кислот; веществ типа фитонцидов [34, 80, 93, 96].

Универсальных методов дезодорации воды на сегодня – не существует, однако, использование некоторых из них в сочетании обеспечивает требуемую степень очистки. Одним из надежных и экономичных методов является применение фильтров с гранулированным активным углем, используемым в качестве фильтрующей загрузки [62, 148]. Фильтры, загруженные гранулированным активным углем независимо от колебания уровня загрязнения воды, являются постоянно действующим барьером по отношению к сорбируемым веществам. Однако серьезным затруднением для применения этого метода очистки воды является сравнительно малая поглощающая способность угля, что вызывает необходимость частой его замены или регенерации. Поэтому, широкое распространение может получить процесс дезодорации при помощи порошкообразных активированных углей т.е. при применении данного метода сорбция одорирующих веществ происходит во взвешенном слое [84, 85, 86].

Используя методы математического моделирования возможно более точно воспроизвести процесс дезодорации воды, и следовательно, разработать ряд рекомендаций, позволяющий повысить эффективность данного процесса, а так же снизить затраты количества адсорбента (в данном случае активированного угля марок ОУ-А и ОУ-В) при обработке природных вод.

Проблемы дезодорации питьевой воды особенно актуальны для города Ижевска: ежегодно из-за ухудшения качества исходной воды (в данном случае воды Ижевского водохранилища) возникают вопросы и по ее очистке [9].

### 1.3. Проблематика систем питьевого водоснабжения в условиях эвтрофированных источников воды и пути решения

Качество питьевой воды напрямую зависит от состояния водоемов, из которых вода поступает на очистку. Эвтрофикация водоемов, которые используются в качестве источника питьевой воды, является одной из основных проблем водоподготовки [35]. Одним из ярких примеров в данной области является Ижевское водохранилище: ежегодно проблема неконтролируемого роста сине-зеленых водорослей приводит к возникновению новых вопросов по водоподготовке [63]. И как следствие дезодорации питьевой воды. Поэтому большой интерес в области очистки воды представляет рассмотрение проблемы дезодорации на примере города Ижевска и Ижевского водохранилища в качестве первопричины. Кроме того, следует рассмотреть работу станции подготовки питьевой воды по очистке от одорирующих веществ исходя из возможностей их модернизации.

Основные причины распространения сине-зеленых водорослей в Ижевском водохранилище представлены на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Основные причины распространения сине-зеленых водорослей

В настоящее время мониторинг качества воды осуществляет МУП г. Ижевска «Ижводоканал» по 25 химическим и 5 микробиологическим показателям, содержанию фитопланктона [65]. Обобщение данных гидрохимических и гидробиологических анализов воды показывает улучшение ситуации по таким показателям, как прозрачность, цветность, взвешенные вещества, медь, ртуть, цинк, никель. Качество воды из источников нецентрализованного водоснабжения остается нестабильным, ухудшается в межсезонные периоды года.

Анализ распределения сбросов сточных вод по предприятиям и водоемам представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Загрязнение водоемов г. Ижевска сточными водами предприятий по данным статистической отчетности 2ТП-водхоз (тыс. м<sup>3</sup> /год)

Водоем	Предприятия	Сброс сточных вод	в том числе:			
			без очистки	недостаточно очищенных	нормативно-чистые	нормативно-очищенные
Ижевский пруд	ТЭЦ-1	4317,2	-	-	4317,2	-
	ОАО "Ижевский мотозавод "Аксион-Холдинг"	292,0	-	-	292,0	-
	МУП "Ижводоканал"	533,0	533,0	-	-	-
р. Иж	ОАО "Ижсталь"	5202,0	981,0	2095,0	2126,0	-
	ОАО "Ижмаш"	1573,7	854,7	719,0	-	-
	МУП "Ижводоканал"	86309,0	-	-	-	86309,0
	ОАО "Ижевский радиозавод" (р.Селычка)	16,9	-	-	-	16,9
	ФГУП "Ижевский механический завод" (р.Селычка)	13,0	-	13,0	-	-
	ОАО ИЭМЗ "Купол"	50,0	-	50,0	-	-
р.Вожойка	ОАО "Буммаш"	775,0	-	775,0	-	-
	ОАО "Ижевский завод пластмасс"	26,0	26,0	-	-	-

## Продолжение таблицы 1.3

Водоём	Предприятия	Сброс сточных вод	в том числе:			
			без очистки	недостаточно очищенных	нормативно-чистые	нормативно очищенные
р.Октябринка	МУП "Ижводоканал"	7771,6	7771,6	-	-	-
р.Старковка	ОАО ИЭМЗ "Купол"	25,0	25,0	-	-	-
р.Пазелинка	ОАО "Ижевский мотозавод "Аксион-Холдинг"	38,0	-	38,0	-	-
р. Карлутка	ФГУП "Ижевский механический завод"	128,0	-	128,0	-	-
	ОАО "Ижевский радиозавод"	52,7	52,7	-	-	-
	УМиА №617 УССТ-6	45,0	-	45,0	-	-
	ОАО "Ижнефтемаш"	3,0	3,0	-	-	-
р. Позимь	ОАО ИЭМЗ "Купол" (р. Чемашурка)	15,0	15,0	-	-	-
ВСЕГО:		107186,1	10262,0	3863,0	6735,2	86325,9
Ижевский пруд		5142,2	533,0	-	4609,2	-
р. Иж		93164,6	1835,7	2877,0	2126,0	86325,9
р. Вожойка		801,0	26,0	775,0	-	-
р. Октябринка		7771,6	7771,6	-	-	-
р. Старковка		25,0	25,0	-	-	-
р. Пазелинка		38,0	-	38,0	-	-
р. Карлутка		228,7	55,7	173,0	-	-
р. Позимь		15,0	15,0	-	-	-

Непосредственно в Ижевский пруд зафиксировано 4 сосредоточенных сбросов сточных вод с общим объемом 5447,7 тыс. м<sup>3</sup>/год:

- нормативно очищенных сточных вод ОАО «Аксион-Холдинг» объемом 192,0 тыс.м<sup>3</sup>/год,
- нормативно чистых от ТЭЦ-1 объемом 3993,0 тыс.м<sup>3</sup>/год,
- без очистки (технологические стоки) от станции подготовки воды «Пруд-Ижевск» МУП г. Ижевска «Ижводоканал» объемом 537,0 тыс.м<sup>3</sup>/год,



– недостаточно очищенных от ГУП «Ижевский ИЭМЗ КУПОЛ» объемом 7,0 тыс. м<sup>3</sup>/год [75].

Кроме того, Ижевский пруд расположен в пониженной части рельефа по отношению к прилегающей территории, что способствует поступлению в него загрязняющих веществ и с неорганизованным поверхностным стоком (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Основные загрязнители Ижевского водохранилища

На берегу Ижевского водохранилища во втором поясе ЗСО водопроводных сооружений вплоть до 80-х гг. прошлого века производился золоотвал ОАО «Иж-сталь», что способствовало дополнительному загрязнению пруда. В настоящее время остатки золоотвала перерабатываются на промплощадке завода [94]. В сельских населенных пунктах канализация практически отсутствует. Сброс сточных вод осуществляется без очистки на рельеф. В сельскохозяйственном водопользовании более половины (51,1%) объема сточных вод сбрасывается без очистки. Имеющиеся очистные сооружения работают неэффективно и нормативной очистке подвергаются около 7% объема сточных вод. На территории бассейна р. Иж в верховье до Ижевского пруда ведется интенсивная добыча нефти, вызывающая постоянное загрязнение водотоков за счет поступления поверхностного

стока с территории нефтедобычи, а также непосредственное загрязнение при аварийных ситуациях.

Работа предприятий по проведению дезодорации питьевой воды. Проблемы с водой в Ижевском водохранилище обострились с 2010 года. Аномально жаркое лето и долгое отсутствие дождей способствовали бурному развитию в Ижевском пруду водорослей, в том числе сине-зеленых, которые в процессе жизнедеятельности, а особенно при отмирании выделяют в воду пахучие вещества, ухудшающие ее ароматические свойства [108].

Значительные средства были затрачены на мероприятия по улучшению ароматических свойств воды: закупка активированного угля, перманганата калия, дополнительного количества реагентов, изменение режима водоснабжения с увеличением доли и территории камской воды. Работа в условиях изменившегося качества источника водоснабжения с внедрением дополнительных технологий с точки зрения эффективности оставляет желать лучшего. Поэтому для более эффективного устранения одорантов из воды Ижевского водохранилища ведется строительство специальных сооружений для предварительной очистки воды, а также для ее дезодорации методом углевания [109].

Для улучшения качества питьевой воды на предприятии был разработан «План мероприятий по улучшению качества питьевой воды в соответствии с требованиями СанПиН» [130]:

– На станции подготовки воды «Пруд-Ижевск» введены в эксплуатацию две контактные камеры для углевания с подводом воздуха и угольной пульпы, что позволило повысить эффективность использования порошковых активированных углей. При введении в эксплуатацию контактных камер эффективность дезодорации активированным углем повысилась на 20-30%.

– На станции подготовки воды «Пруд-Ижевск» запущен дополнительно еще один резервуар чистой воды (третий), который позволил за счет увеличения регулирующего объема обеспечить более равномерную работу сооружений СПВ «Пруд-Ижевск», что также повышает эффективность очистки воды.

– Продолжены работы по перегрузке скорых фильтров с созданием двухслойной загрузки для увеличения грязеемкости.

– Проведены производственные испытания известкового теста, который позволит более эффективно снижать рН-уровень камской воды (т.е. стабилизировать). Получено согласование Роспотребнадзора по Удмуртской Республике на внедрение реагента в производство.

– Были продолжены работы по поиску дополнительных технологий по удалению одорирующих веществ и марганца. На мини- модели в производственных условиях были испытаны сетчатые дисковые фильтры израильской фирмы «*Arkal*» для предварительной очистки воды от водорослей. В лабораторных условиях испытаны опытные образцы загрузок «*FIBrA - Fillis 4*» для удаления марганца на стадии фильтрации.

Мониторинг качества воды в районе водозабора по гидробиологическим показателям не позволяет надеяться на улучшение ситуации, более того является основанием для еще более неблагоприятного прогноза по развитию водорослей, а значит и по уровню ухудшения ароматических свойств воды в сезон «цветения». Ухудшается качество воды и по микробиологическим показателям, и по химическим. Таким образом, можно сделать вывод о том, что состояние Ижевского пруда характеризуется стабильно тяжелым [89].

Очищенная вода по микробиологическим, вирусологическим и физико-химическим показателям полностью соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к питьевой воде. Отмечалось только превышение нормативов по органолептическим показателям в летний период. Для здоровья человека вода полностью безопасна по заключению Роспотребнадзора.

В процессе транспортировки воды до потребителей происходит ее вторичное загрязнение, что сказывается на таких физико-химических показателях как мутность, цветность, железо, а также микробиологических.

Основной причиной вторичного загрязнения воды в разводящих сетях является высокий процент износа водопроводных сетей, большой процент

стальных труб, низкие скорости движения воды в трубах, рассчитанных при укладке на рост города, наличие тупиковых участков.

По данным производственного контроля качества воды количество нестандартных проб по микробиологическим показателям, отобранных на разводящей сети города в год составило 2,7 %, что соответствует нормам СанПиН (не более 5% за год) [139].

Анализ работы СПО «Пруд-Ижевск». На левом берегу Ижевского пруда, в верхней его трети расположена станция подготовки воды (СПВ) «Пруд-Ижевск», в состав которой входят водопроводные узлы (ВУ) 1, 2 и 3.

ВУ-1 введен в эксплуатацию в 1964г. Полезная производительность – 100 тыс.м<sup>3</sup>/сут, полная – 108 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Водозабор расположен в 25 метрах от кромки берегового откоса.

Состав водозаборных сооружений: самотечные линии с водоприемными оголовками; приемная камера, совмещенная с насосной станцией 1 подъема.

Забор воды производится двумя затопленными водоприемными оголовками с рыбозащитными устройствами зонтичного типа, установленными в 1997 году. По двум самотечным водоводам Д-1200 вода поступает в водоприемное отделение, размещенное в центре насосной станции 1 подъема. Водоприемное отделение – колодец диаметром 7.2 м, разделенный поперечной стенкой на две камеры, оборудованные вращающимися сетками [138].

По напорным линиям из стальных труб вода поступает на станцию подготовки воды «Пруд-Ижевск» (ВУ-2). Протяженность водоводов составляет 838м и 840м.

Проектная производительность ВУ-2 составляет 100 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Расход воды на собственные нужды (промывка фильтров, гидравлическое удаление осадка из отстойников) составляет 8%. Станция предназначена для обработки воды поверхностных источников с наибольшим содержанием взвешенных веществ до 1000 мг/дм<sup>3</sup> (с возможным увеличением в отдельные дни до 2000 мг/дм<sup>3</sup>) и цветностью до 150 град [130].

Дезодорация поверхностных природных воды на рассматриваемой СПВ проводится по двухступенчатой системе. В состав ВУ-2 входят два резервуара чистой воды (РЧВ) объемом  $5000 \text{ м}^3$  каждый.

ВУ-3 введен в эксплуатацию в 1932 г. Это сооружение производительностью  $7,8 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$  В 1953 году было проведено расширение станции с увеличением производительности до  $27 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$

Состав сооружений ВУ-3: самотечная линия с оголовком; насосная станция I подъема, совмещенная с насосной станцией II подъема; станция подготовки воды [138].

Вода из источника поступает через стальной оголовок с рыбозащитным устройством зонтичного типа, по стальному самотечному водоводу Д-600 мм, протяженностью 140 м, на насосную станцию 1-го подъема. Имеется второй резервный водовод Д-530 мм неочищенной воды от ВУ-1.

В состав ВУ-3 входят 2 РЧВ по  $560 \text{ м}^3$  каждый [34].

Для подготовки воды на ВУ-2 и ВУ-3 в настоящее время применяются следующие реагенты [138]:

- перманганат калия – для окисления  $\text{Mn(II)}$ , который вводится в водоприемное отделение насосной станции 1-го подъема в периоды повышенного содержания марганца в прудовой воде;

- коагулянты – сульфат алюминия (в теплый период года) и полиоксихлорид алюминия марки «Аква-Аурат-30» (в холодное время года). Ввод коагулянта осуществляется перед смесителем после первичного хлорирования. При необходимости предусмотрена дополнительная точка ввода коагулянта (контактное коагулирование);

- для интенсификации процессов хлопьеобразования в трубопровод между смесителем и камерами реакции вводятся флокулянты, в качестве которых

- используются полиакриламидные полиэлектролиты (Праестол 650TR, 2515, 2530) и ВПК-402 (в паводковый период);

- порошок активированный уголь – для удаления органических веществ; вводится в смеситель и перед фильтрами;

- обеззараживающий реагент – жидкий хлор, который вводится трижды: перед смесителем до ввода коагулянта (первичное хлорирование, доза 1 мг/л), перед фильтрами (дробное хлорирование, доза 1 мг/л) и перед РЧВ (вторичное хлорирование, доза 0,9 мг/л); в период усиления органолептических свойств исходной воды производится двукратное хлорирование: перед фильтрами в дозе 2-3 мг/л и перед РЧВ в дозе 0,4-1,2 мг/л [139].

Рабочая программа производственного контроля качества воды водоемника и питьевой воды разработана на основании расширенных исследований и включает 58 показателей, из них 7 – обобщенных, 5 – органолептических, 35 – химических, 5 – микробиологических, 2 – паразитологических, 4 – гидробиологических [139].

Таким образом, водоем, служащий основным источником питьевого водоснабжения г. Ижевск, не защищен от загрязнения хозяйственно-бытовыми, коммунальными, промышленными сточными водами, а также за счет нерегулируемого поверхностного стока. Поскольку водоем находится в черте города, в него вносятся дополнительное биологическое и химическое загрязнение при рекреационном водопользовании. Многолетние накопления загрязненных донных отложений создают опасность вторичного загрязнения воды, а также развития эвтрофикации.

Водопроводные очистные сооружения отвечают современным требованиям. Это позволяет предположить, что в отсутствие форс-мажорных обстоятельств возможно обеспечение населения безопасной питьевой водой.

#### 1.4. Сорбционные методы дезодорации питьевой воды и применение ПАУ

Для дезодорации воды сорбцией используют гранулированный и порошкообразный активный уголь, активированный антрацит, углеродные волокнистые материалы, неуглеродные адсорбенты (клиноптилолит, цеолиты).

Сорбционный метод дезодорации является более надежным, по сравнению с окислительным, так как он основан не на трансформации органических веществ, а на их извлечении из воды [104, 121].

Из известных на сегодняшний день сорбентов для питьевой воды наиболее эффективны порошкообразные активированные угли. Хорошо сорбируются активным углем гидрофобные вещества, т. е. плохо растворимые в ней и слабо гидратирующиеся в растворах (слабые органические электролиты, фенолы), полициклические ароматические углеводороды, в том числе канцерогенные, большинство нефтепродуктов, хлор- и фосфорорганические пестициды и многие другие органические загрязнения [38, 127]. Менее эффективно сорбируются активным углем более сильные органические электролиты и многие органические ациклические соединения (карбоновые кислоты, альдегиды, кетоны, спирты). Однако, и сорбцию на активных углях нельзя рассматривать в качестве универсального средства очистки воды от органических соединений. Так, имеются вещества, которые ими не задерживаются (например, органические амины) или задерживаются плохо (например, синтетические поверхностно-активные вещества).

Активные угли применяют в виде порошка (углевание воды) или в виде гранул в качестве загрузки фильтров.

Углевание. Органические примеси лучше сорбируются мелкими фракциями угля, которые не могут быть использованы в фильтрах [129]. Недостатки углевания: трудности, связанные с замачиванием и дозированием угля, с необходимостью иметь емкости для контакта его с обрабатываемой водой. Преимуществами является меньшая стоимость ПАУ по сравнению с ГАУ, возможность углевания тогда, когда оно должно проводиться эпизодически, кратковременно и в неболь-

ших дозах [133]. Геосмин извлекается ПАУ намного эффективнее, чем МИБ, для эффективного изъятия МИБ время контакта с ПАУ должно быть не менее часа [136].

Более надежным является применение гранулированных активных углей, используемых в качестве фильтрующей загрузки. Фильтры, загруженные гранулированным активным углем независимо от колебания уровня загрязнения воды, служат постоянно действующим барьером по отношению к сорбируемым веществам, если емкость угля не исчерпана, но гранулы слабее связывают гуминовые кислоты, чем ПАУ [143]. Недостатком применения угольных фильтров является необходимость регенерации активного угля, которая может производиться следующими методами: химическим, термическим и биологическим.

В присутствии механических примесей сорбционная емкость активного угля снижается. Поэтому поступающая на обработку активным углем вода должна содержать не более 10 мг/л взвешенных веществ. Аналогично влияют продукты гидролиза сульфата алюминия. Ухудшается кинетика сорбции и снижается динамическая емкость также при насыщении активного угля солями и оксидами железа. Последние, осаждаясь на угле, закрывают поры и затрудняют процесс регенерации. По этой причине часто при добавлении угольной суспензии совместно с коагулянтом до отстойников ее требуется несколько больше, чем при добавлении перед фильтрами [150].

Также эффективным методом улучшения ароматических свойств воды является биосорбция: фиксирование на фильтре с ГАУ бактериальной массы.

Преимущества очистки воды АУ: простота реагентного хозяйства, сохранение постоянства состава воды, высокий эффект дезодорации воды, возможность улавливания нежелательных органических примесей и снижение бактериального загрязнения [73, 76, 152]. Однако, эффективность действия АУ в отношении примесей поверхностной воды зависит от времени года, так как качественный и количественный состав органических веществ меняется, особенно в периоды весеннего и осеннего паводков. АУ не обеспечивает глубокой очистки от органических веществ гумусовой природы, вследствие этого марку АУ необходимо выбирать



только после экспериментальной проверки его пригодности для очистки воды конкретного источника [37, 70, 71, 146].

Высокой сорбционной емкостью и повышенной по сравнению с активным углем удельной поверхностью (до 2000 м<sup>2</sup>/г) обладают разработанные новые сорбенты - углеродные волокнистые материалы. Их получают из полимерных гидратцеллюлозных и полиакрилонитриловых волокон термообработкой в потоке благородных газов при 600—1050 °С [131, 145]. Для увеличения сорбционной емкости в процессе обработки сырья к нему добавляют соли тяжелых и редкоземельных металлов.

Все шире применяются для обесцвечивания воды, удаления из неё неорганических примесей и особо токсичных хлорорганических соединений и гербицидов неуглеродные сорбенты — клиноптилолит, глинистые породы, цеолиты [50, 52, 64, 66, 106]. Использование таких сорбентов обусловлено их достаточно высокой ёмкостью, избирательностью, катионообменными свойствами некоторых из них, сравнительно низкой стоимостью и доступностью.

Наибольшее распространение глинистые материалы получили для обесцвечивания воды, удаления неорганических примесей и особо токсичных хлорорганических соединений и гербицидов, различных ПАВ. Природные цеолиты используются в виде порошков и фильтрующих материалов для очистки воды от ПАВ, ароматических и канцерогенных органических соединений, красителей, пестицидов, коллоидных и бактериальных загрязнений [24, 27, 33, 103, 128].

Кроме того, установлено, что из воды хорошо сорбируется активным углем гидрофобные вещества, т. е. плохо растворимые в ней и слабо гидратирующиеся в растворах (слабые органические электролиты, фенолы). Менее эффективно сорбируются активным углем более сильные органические электролиты и многие органические ациклические соединения (карбоновые кислоты, альдегиды, кетоны, спирты).

Рассматривая вопросы применения сорбционных методов следует учитывать и определение оптимальных параметров сорбента в дезодорации питьевой воды.

Разработка и проведение на предприятии экспериментальных исследований технологического процесса дезодорации воды является дорогостоящим процессом с необходимостью привлечения всех ресурсов. Кроме того, существует вероятность нарушения водоснабжения населенных пунктов, что является недопустимым. Более перспективным будет являться проведение исследований на теоретическом уровне, т.е. разработка модели: это позволит сберечь ресурсы, более подробно рассмотреть изменение процессов с течением времени (кроме того, появится возможность прогнозирования), а так же выявить закономерности технологического процесса.

При помощи методов математического моделирования, представляется возможным на теоретическом уровне, на основании определенных данных, рассчитать процессы дезодорации питьевой воды, тем самым оптимизировать и повысить эффективность очистки.

### **1.5. Возможность применения моделирования к проблемам дезодорации в системе питьевого водоснабжения**

Для процессов дезодорации питьевой воды математическое моделирование позволяет определить для разработки исследований максимально важные свойства объекта. Разработка модели позволит сформулировать и выявить новые связи для значений параметров технологического процесса дезодорации на станции подготовки воды [78, 100]. Моделирование сложных технологических процессов (таких как дезодорации на производстве) предоставляет возможность избежать больших затрат ресурсов, которые нужны для проведения исследований. Разработка модели и формализация элементов допускает возможность устранения проблематики в знании об объекте, позволяет выявить новые проблемы, которые до этого не предусматривались. Моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Применения моделирования к рассматриваемой проблеме позволит определить основные факторы, которые определяют свойства технологического процесса дезодорации на СПВ, в частности, исследовать отклик

изменения параметров процесса в зависимости от качества исходной воды [25, 47, 51, 68, 74, 110].

Преимущества моделирования для процесса дезодорации питьевой воды:

- сокращение затрат на проведение экспериментальных исследований;
- возможность рассмотрения процесса во времени;
- совершать многократные испытания, каждый раз возвращая модель в первичное состояние;
- возможность прогнозирования рассматриваемого процесса;
- возможность выявления общих закономерностей;
- получать разные характеристики объекта в числовом или графическом виде;
- находить оптимальные параметры объекта, не прибегая к пробным экспериментам;
- проводить эксперименты без риска негативных последствий для здоровья человека или окружающей среды.

Недостатки моделирования:

- предопределенность результатов моделирования свойствами выбранного метода моделирования;
- запрограммированность результата свойствами самой модели (в рамках выбранного метода).
- Преимущества и недостатки моделирования для процесса дезодорации представлены на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Основные преимущества и недостатки применения моделирования к проблеме дезодорации воды

Применение математического моделирования к проблемам дезодорации воды и применению сорбентов рассматривались в работах Гусева Е.Е., «Одорирующие вещества биологического происхождения в природных водах и способы их удаления при водоподготовке» [49], в которой рассмотрен прогноз появления одорирующих веществ в водоисточниках при помощи корреляционного и регрессионного анализа данных; Енютиной С.Г. «Математическое моделирование как основа энергосбережения в процессе дезодорации» [61], в которой рассматривается возможность применения математического моделирования к вопросам дезодорации; Герасимова М.М. «Разработка методов повышения барьерных функций очистных сооружений водопроводов в отношении антропогенных загрязнений» [35], в которой научно и практически обосновывается методика для выбора порошкообразного активированного угля (ПАУ); а так же в работах Малыгина К.А., Цхе А.А., Рогалевой Л.В., Смагной Н.А., Сапиной Н.В., Гандуриной Л.В., Сомина В.А., Кутковец А.А. Трусовой В.В., Грун Н.А., Гутенева В.В., Смирнова А.Д., Климова Е.С.

Кроме того, следует определить условия для разработки модели: показатели исходной воды являются неконтролируемым параметром, показатели питьевой

воды -обязательным условием (данное условие формируется согласно перечню СанПиН 2.1.4.559-96), параметры процесса дезодорации (основные параметры: дозирование сорбента, его адсорбционная активность и время контакта с водой) являются контролируруемыми параметрами, оптимальное значение которых моделируется в зависимости от показателей исходной и питьевой воды (рисунок 1.16).

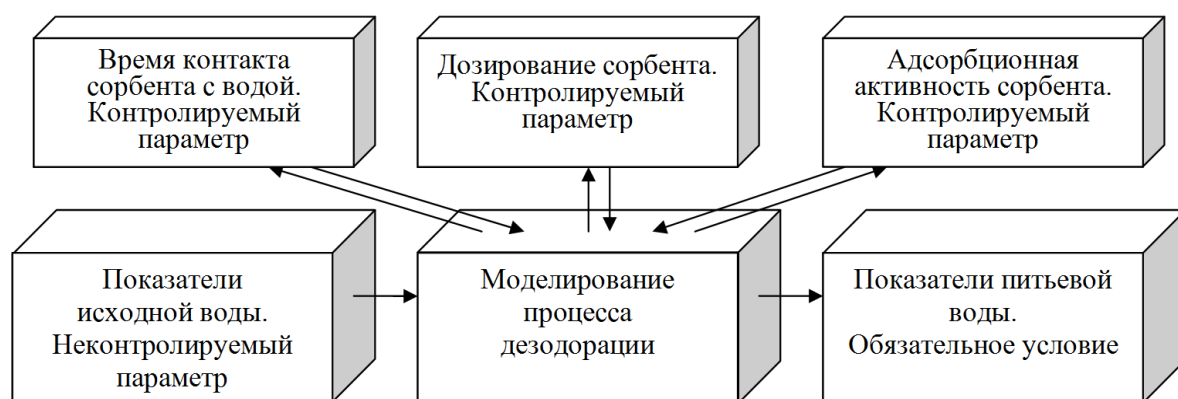


Рисунок 1.16 – Определение условий для разработки модели параметров дезодорации питьевой воды

При разработке модели следует рассматривать технологическую схему водоснабжения и дезодорации как систему процессами и работой которой можно управлять, а так же моделировать. Примерами могут послужить работы В.Н. Коваленко [81, 82].

В разработке модели параметров дезодорации питьевой воды особый интерес представляет применение искусственной нейронной сети (ИНС): в отличие от линейных методов статистики она позволяет создать нелинейные зависимости и тем самым более точно описывать рассматриваемые процессы [31, 32, 40, 39, 41]. Кроме того, нейронная сеть обучается на всей выборке, не фрагментируя её, что повышает точность результатов. Актуальность исследований в этом направлении подтверждается и массой различных применений нейросетей. Это автоматизация процессов распознавания образов, адаптивное управление, аппроксимация функционалов, прогнозирование, создание экспертных систем, организация ассоциативной памяти и многие другие приложения [28, 54, 57, 59, 60, 72, 105].

Применение искусственных нейронных сетей рассматривались в работах Ефремова А. С., Горнова А. Ю., Васильева А. Н., Проказова С. А., Макаренко А. А., Сичинава З. И., Оганезова А. Л., Тиндовой М. Г., Дягтерева С. А., Шулаковой М. А., Коваленко М. П., Якимовича Б. А., Тененева В. А.

Кроме того, представляется актуальным проведение корреляционного и регрессионного анализа данных для показателей исходной и питьевой воды, а также параметров дезодорации. Преимущества корреляционного анализа очевидны: он позволяет выявить наличие связи между рассматриваемыми параметрами; его можно применять в ряде особых случаев, в которых экспериментальный подход сопряжен с трудностями или даже невозможен; позволяет получать информацию, основанную на более разнообразных выборках и более близкую к существующим реальным условиям - в отличие от результатов экспериментов, проводимых в лаборатории. Основным же преимуществом регрессионного анализа является выявление факторов, способных наиболее сильно влиять на целевые показатели, а также возможность концентрировать усилия на развитии тех параметров, которые способны улучшить ситуацию в области дезодорации воды.

### **Выводы по главе**

Было установлено, что на сегодняшний день одним из актуальных вопросов современности в области охраны окружающей среды является очистка питьевой воды, в частности, проблема очистки воды от одорирующих веществ. Одним из перспективных решений проблемы удаления одорирующих веществ является применение методов дезодорации с использованием адсорбентов, например, таких как активированный уголь: методы углевания воды представляют собой эффективное решение для очистки питьевой воды от одорирующих веществ, тем самым улучшая ее органолептические свойства.

Однако данные процессы являются малоизученными, поэтому особое значение в свете новых задач приобретает разработка методов математического моделирования, позволяющих на теоретическом уровне, на основании проанализи-

рованных данных, рассчитать процессы удаления одорирующих веществ при обработке природных вод, тем самым оптимизировать и повысить эффективность очистки питьевой воды, сократить расход адсорбента, а так же его остаток после сезонной очистки. Исходя из вышесказанного, была поставлена цель: разработка модели управления технологическим процессом дезодорации поверхностных вод на городских очистных сооружениях в условиях поверхностных водоисточников..

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ проблемы очистки и дезодорации воды на городских сооружениях и путей ее решения в условиях эвтрофированных водоисточников.
2. Реализовать корреляционный анализ данных для значений показателей исходной и питьевой воды и разработать регрессионную модель на его основе для процесса дезодорации воды.
3. Разработать модели поведения основных параметров дезодорации воды с использованием нейронных сетей глубокого обучения.
4. Проверить адекватность полученных результатов и возможность их применения в качестве инструмента улучшения технологического процесса дезодорации питьевой воды.

## **ГЛАВА 2. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕГРЕССИОННАЯ СТАТИСТИКА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ**

Для проведения корреляционного анализа данных и регрессионного моделирования на его основе, рассмотрим несколько показателей исходной и питьевой воды. В качестве примера для исходной воды возьмем основные показатели воды Ижевского водохранилища, которые учитываются каждый месяц на очистных сооружениях [138]. Среди них: одорирующие вещества в исходной воде (выраженные в баллах от 1 до 5), фенольный индекс, концентрация хлоридов, биологическое потребление кислорода, концентрация сине-зеленых водорослей, мутность, цветность. Так же будет учитываться температура окружающей среды и температура воды. Среди параметров питьевой воды рассмотрим наиболее важные для органолептических свойств, а именно: органолептические свойства концентрация геосмина, концентрация хлороформа, концентрация хлоридов, фенольный индекс. Обоснованием данного выбора параметров служит во-первых их значительное влияние на положительные ароматические свойства воды [138], а во-вторых возможность идентификации данных параметров в лабораторных условиях предприятия.

Для начала следует рассмотреть исходную воду, от состояния которой зависит определение параметров дезодорации и качество питьевой воды. В первую очередь данный вопрос касается неконтролируемого распространения сине-зеленых водорослей, которые являются одной из основных причин ухудшения органолептических свойств прудовой воды.



## 2.1. Предпосылки и возможность применения корреляционного анализа данных и регрессионной статистики для процесса дезодорации

Предпосылками применения регрессионной статистики для процесса дезодорации стала разработанная регрессионная модель распространения сине-зеленых водорослей в водоеме, а так же способ оценки риска распространения сине-зеленых водорослей в водоеме. Как известно, одной из основных причин ухудшения органолептических свойств воды является неконтролируемое распространение сине-зеленых водорослей, данная проблема возникла еще в 2002 году и является до сих пор не решенной [108]. Основным вопросом является то, что рост сине-зеленых водорослей практически невозможно предугадать, а значит и невозможно определить органолептические свойства исходной воды, и как следствие, параметры адсорбента при дезодорации воды.

В связи с этим был разработан способ оценки риска размножения сине-зеленых водорослей. Целью способа является повышение качества оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме. Способ был разработан с помощью математического метода пошаговой регрессии.

Поставленная задача решается тем, что, по формуле (1) [111, 112]:

$$K = -0,89628 + 0,708739 A - 1,19525 B + 0,174647 C \quad (1)$$

где:

$K$  – показатель риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме,

$A$  – средняя температура воды водоема (в градусах по шкале Цельсия),

$B$  - уровень выпавших осадков (см),

$C$  - влажность воздуха (%),

определяется риск размножения сине-зеленых водорослей в водоеме. При значении  $K$  от 0 до 3 прогнозируется низкий риск размножения сине-зеленых водорослей в водоеме, , при значении  $K$  от 3 до 7 прогнозируется средняя степень риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме, при значении  $K$  выше 7 про-

гнозируется высокий риск размножения сине-зеленых водорослей в водоеме [111, 112] (Приложение Г, Д).

Преимуществами способа являются высокая точность, простота в выполнении, дешевизна и возможность определения риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме.

Известен способ определения экологического состояния пресноводных водоемов [149], основанный на определении показателя трофности водоема путем измерения гидрохимических параметров:  $pH$  и содержания растворенного кислорода. Недостатком такого способа является ограничение функциональных возможностей, обусловленное определением состояния водоема только по гидрохимическим показателям.

Известен способ определения экологического состояния водоемов [102], заключающийся в том, что в способе определения экологического состояния водоемов, по которому измеряют гидробиологические показатели, согласно изобретению для оценки экологического состояния водоема одновременно с гидробиологическими показателями - индекс сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладечек - измеряют гидрохимические показатели - водородный показатель, химическое потребление кислорода, концентрация растворенного кислорода и электропроводность, рассчитывают сводный показатель. На основе данных о типе водоема (проточный или непроточный), о времени года (лето или зима) и по рассчитанному значению сводного показателя ( $Q$ ), путем сравнения определяют экологическое состояние водоема. Способ позволяет оперативно определить экологическое состояние водоема по гидрохимическим и гидробиологическим показателям. Недостатком такого способа является ограничение функциональных возможностей, обусловленное определением состояния водоема только по гидробиологическим показателям.

Пример 1. В Ижевском водохранилище в 2010 году были проведены замеры: средняя температура воды водоема (в градусах по шкале Цельсия) -19 градусов, уровень выпавших осадков (см) – 12,3 см, влажность воздуха (%) -70% [138]. Риск размножения сине-зеленых водорослей в водоеме был рассчитан по предла-

гаемой формуле. Он оказался равным 10,0375 (очень высокий риск). При этом уровень сине-зеленых водорослей достиг 439,72 тыс. клеток/мл (очень высокий).

Пример 2. В Ижевском водохранилище в 2002 году были проведены замеры: средняя температура воды водоема (в градусах по шкале Цельсия) -13,4 градусов, уровень выпавших осадков (см) – 16,3 см, влажность воздуха (%) -76,8% [138]. Риск размножения сине-зеленых водорослей в водоеме был рассчитан по предлагаемой формуле. Он оказался равным 2,4759 (низкий риск размножения сине-зеленых водорослей в водоеме). При этом уровень сине-зеленых водорослей достиг 8,5 тыс.кл/мл (низкий уровень). В 2015 году по данному способу был получен патент № 2559561 [111] (Приложение Г).

Следует так же отметить, что пользуясь способом оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме можно заранее определить не только рост сине-зеленых водорослей Ижевского водохранилища, но и органолептические свойства исходной воды, а в последующем и оптимальные параметры при дезодорации питьевой воды.

## **2.2. Корреляционный анализ данных и регрессионная модель для основных параметров питьевой воды**

Для исследования и последующего численного моделирования технологического процесса дезодорации поверхностных вод на СПВ в первую очередь необходимо выявить существующие взаимосвязи между значениями параметров процесса и показателей воды, кроме того, следует дать им количественную оценку [36]. Общепринятым решениями вышеуказанной задачи являются методы корреляционного анализа и регрессионного моделирования.

Формирование выборки на основе данных СПВ «Пруд-Ижевск» и проведение корреляционного анализа данных позволит оценить силу связи и проверить статистические гипотезы, на основе которых в дальнейшем можно будет разработать модель. Не все факторы, влияющие на процессы, являются случайными ве-

личинами, поэтому при анализе обычно рассматриваются связи между случайными и неслучайными величинами [36, 56].

В качестве исследования возможности применения корреляционного анализа данных и регрессионного моделирования, воспользуемся данными, сформированных на основе показателей МУП «Ижводоканал» [138].

Для выявления связи между показателями исходной и питьевой воды был проведен корреляционный анализ данных. В результате которого были получены коэффициенты корреляции. Основные результаты представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Результаты корреляционного анализа. Коэффициенты корреляции

Показатели		Параметры исходной воды									Параметры питьевой воды				
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>
		Органолеп- тические свойства	Температу- ра воды	Температу- ра ОС	Фенольный индекс	Хлориды	БПК полное	Сине- зеленые во- доросли	Мутность	Цветность	Органолеп- тические свойства	Геосмин	хлороформ	хлориды	фенольный индекс
Исходная вода	Органолептические свойства	1,0	0,4	0,3	0,01	-0,1	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,6	0,6	0,0
	Температура воды	0,4	1,0	0,9	0,0	-0,1	0,2	0,01	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	-0,1
	Температура ОС	0,3	0,9	1,0	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	-0,1
	Фенольный индекс	0,01	0,0	-0,1	1,0	-0,2	-0,1	0,1	0,0	0,2	-0,1	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
	Хлориды	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	1,0	-0,1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2	-0,4	-0,3	-0,2	-0,3
	БПК полное	0,5	0,2	0,1	-0,1	-0,1	1,0	0,5	0,5	0,1	0,6	0,5	0,9	0,9	0,1
	Сине-зеленые водоросли	0,4	0,01	-0,1	0,1	-0,4	0,5	1,0	0,7	0,5	0,5	0,9	0,6	0,6	0,2
	Мутность	0,4	0,2	0,1	0,0	-0,4	0,5	0,7	1,0	0,4	0,5	0,7	0,5	0,4	0,3
	Цветность	0,4	0,1	0,1	0,2	-0,4	0,1	0,5	0,4	1,0	0,1	0,6	0,2	0,1	0,4
Питьевая вода	Органолептические свойства	0,6	0,3	0,2	-0,1	-0,2	0,6	0,5	0,5	0,1	1,0	0,5	0,6	0,7	0,0
	Геосмин	0,5	0,1	0,0	0,1	-0,4	0,5	0,9	0,7	0,6	0,5	1,0	0,6	0,6	0,2
	хлороформ	0,6	0,2	0,1	-0,2	-0,3	0,9	0,6	0,5	0,2	0,6	0,6	1,0	0,9	0,2
	хлориды	0,6	0,3	0,1	-0,1	-0,2	0,9	0,6	0,4	0,1	0,7	0,6	0,9	1,0	0,0
	фенольный индекс	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,0	0,2	0,2	0,0	1,0

Корреляция между параметрами является свидетельством существования статистической связи в рассматриваемой выборке, но эта связь не всегда должна наблюдаться для другой выборки и иметь определенный причинно-следственный характер [29, 48, 53]. В данном случае рассматривается не причинно-следственная зависимость параметров, а лишь их статистическая взаимосвязь на основе которой можно сделать определенные выводы для разработки уравнений регрессии.

Коэффициенты корреляции выше 0,5 из таблицы 2.1 свидетельствуют о высокой степени корреляционной связи статистических данных [125].

Как видно из таблицы 2.1, существует корреляционная связь между параметрами прудовой и питьевой воды. Для параметра органолептические свойства в чистой воде существуют лишь два коэффициента выше 0,5 поэтому данный показатель рассматривать не будем

Регрессионная модель показателей питьевой воды. Очень часто в исследованиях процессов появляется проблема аппроксимировать диаграммы рассеяния уравнениями математической статистики. Другими словами, зависимости между переменными (например,  $Z$  и  $X$ ) можно отобразить с помощью формул и уравнений и графически в виде определенного места точек в системе координат [107]. В рассматриваемом случае данными переменными являются показатели исходной и питьевой воды.

Исходя из вышесказанного, задача состоит в том, чтобы форму корреляционной связи между показателями питьевой и исходной (в данном случае прудовой) воды выразить уравнением функции, что позволит получить нужную информацию, предвидеть возможные изменения технологического процесса дезодорации на станции подготовки [56, 29]. В качестве переменных  $X$  были взяты показатели исходной воды, а переменной  $Z$  – показатели питьевой воды, для которых коэффициенты корреляции превышали 0,5.

По результатам корреляционного анализа рассмотрим регрессионное моделирование показателей питьевой воды на основе показателей прудовой воды. Для таких показатели как концентрация геосмина, хлороформа и хлоридов в чистой

воде присутствует высокая степень корреляционной связи статистических данных относительно показателей прудовой воды (коэффициенты корреляции выше 0,5 из таблицы 2.1 свидетельствуют об этом).

Для показателя органолептические свойства питьевой воды в баллах так же имеются коэффициенты корреляции выше 0,5, однако только в двух случаях, поэтому регрессионная модель для данного показателя рассматриваться не будет.

Для остальных показателей питьевой и прудовой воды корреляционная связь не наблюдается, что доказывает высокую степень эффективности работы МУП «Ижводоканал».

Были выбраны основные параметры исходной воды (таблица 2.1), которые ежемесячно (с 2002 по 2014 год) учитывались на предприятии при дезодорации воды и которые оказывают существенное влияние на ее органолептические свойства. Была сформирована выборка состоящая из 62 точек, каждому из параметров присвоены значения  $X$ :

$X_1$  – органолептические свойства в исходной воде, баллы;

$X_2$  – температура воды,  $С^0$ ;

$X_3$  – температура,  $С^0$ ;

$X_4$  – фенольный индекс;

$X_5$  – концентрация хлоридов, мг/л;

$X_6$  – биологическое потребление кислорода, мг/л;

$X_7$  – концентрация сине-зеленых водорослей, тыс.кл/мл;

$X_8$  – мутность исходной воды, мг/л;

$X_9$  – цветность исходной воды, градусы.

Для выявления зависимости между входными параметрами (в данном случае – параметры исходной воды ( $X$ )) был проведен корреляционный анализ данных (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Результаты корреляционного анализа входных параметров (X)

Параметры	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
$X_1$	1,00	0,44	0,32	0,01	-0,14	0,51	0,43	0,49	0,36
$X_2$	0,44	1,00	0,94	0,00	-0,06	0,18	0,00	0,19	0,14
$X_3$	0,32	0,94	1,00	-0,06	-0,10	0,07	-0,10	0,11	0,09
$X_4$	0,01	0,00	-0,06	1,00	-0,17	-0,15	0,11	0,03	0,22
$X_5$	-0,14	-0,06	-0,10	-0,17	1,00	-0,05	-0,38	-0,37	-0,49
$X_6$	0,51	0,18	0,07	-0,15	-0,05	1,00	0,48	0,45	0,15
$X_7$	0,43	0,00	-0,10	0,11	-0,38	0,48	1,00	0,70	0,53
$X_8$	0,49	0,19	0,11	0,03	-0,37	0,45	0,70	1,00	0,49
$X_9$	0,36	0,14	0,09	0,22	-0,49	0,15	0,53	0,49	1,00

Для устранения мультиколлинеарности между параметрами  $X$  был применен метод главных компонент (МГК). Метод главных компонент является одним из основных методов исключения переменных из модели множественной регрессии. Данный метод используется для исключения или уменьшения мультиколлинеарности факторных переменных модели регрессии. Сокращение числа факторных переменных до наиболее существенно влияющих факторов достигается с помощью линейного преобразования всех факторных переменных в новые переменные. При этом выдвигается требование, чтобы выделению первой главной компоненты соответствовал максимум общей дисперсии всех факторных переменных, второй компоненте – максимум оставшейся дисперсии, после того как влияние первой главной компоненты исключается и т. д. [134].

Рассмотрим подробнее метод главных компонент. Метод разработан К. Пирсоном в 1901 году. Приведем метод, согласно работе [154].

Определение 1. Пусть  $X = \{x_i\}, i = \overline{1, k}$  – случайный вектор. Определим вектор

$$Y = \{y_i\}, i = \overline{1, k}, \text{ где } y_i = \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_j \text{ – } i\text{-я главная компонента вектора } X.$$



Теперь определим матрицу  $\beta = \{\beta_{ij}\}, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, k}$  ее строки – векторы размерности  $k$ . Таким образом  $y_i = \beta_i^T X$  и, следовательно,  $Y = \beta^T X$ .

Замечание: пусть  $\Omega = [\sigma_{ij}], i = \overline{1, k}, j = \overline{1, k}$  – ковариационная матрица компонентов вектора  $X$ . Тогда ковариационная матрица компонентов вектора  $Y$  может быть получена, как  $\Omega_Y = \beta^T \Omega \beta$ . Таким образом выборочная дисперсия и выборочная ковариация могут быть получены, как

$$D(Y_i) = \sum_{l=1}^k \sum_{p=1}^k \beta_{lp} \beta_{ip} \sigma_{lp} = \beta_i^T \Omega \beta_i \quad (2)$$

$$\text{cov}(Y_i, Y_j) = \sum_{l=1}^k \sum_{p=1}^k \beta_{lj} \beta_{ip} \sigma_{lp} = \beta_i^T \Omega \beta_j \quad (3)$$

Замечание: наша цель выбрать такие коэффициенты  $\beta_{ij}$ , которые задают максимум выборочной дисперсии  $D(Y_i)$ , при условии  $\text{cov}(Y_i, Y_j) = 0, \forall i \neq j$ . Найдем эти коэффициенты, используя теорему о спектральном разложении матрицы. Так как ковариационная матрица симметрическая, то корню характеристического уравнения кратности  $m$  соответствует ровно  $m$  линейно независимых векторов. Следовательно  $\Omega = \beta D \beta^T$ , где столбцы матрицы  $\beta$   $\beta_1, \dots, \beta_k$  – единичные собственные векторы матрицы  $\Omega$  соответствующие собственным числам  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ .  $D = E(\lambda_1, \dots, \lambda_k)^T$  – диагональная матрица, с собственными числами матрицы  $\Omega$  на главной диагонали. Другими словами

$$\Omega = \sum_{j=1}^k \lambda_j \beta_j \beta_j^T. \quad (4)$$

Свойство 1. Если  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k$  собственные числа матрицы  $\Omega$ , а  $\beta_1, \dots, \beta_k$  – соответствующие им единичные собственные векторы, то  $\Omega = \sum_{j=1}^k \lambda_j \beta_j \beta_j^T$  и, следовательно,  $D(Y_i) = \lambda_i$  и  $\text{cov}(Y_i, Y_j) = 0$ .

Свойство 2. След матрицы  $\Omega$   $Sp(\Omega) = \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^k \lambda_i$ .

Замечание. Следовательно, общая дисперсия вектора  $X$

$$D(X) = \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 = Sp(\Omega). \quad (5)$$

Однако по свойству (1)  $D(X) = D(Y)$ . Таким образом, часть выборочной дисперсии (вектора  $X$  или  $Y$ ) объяснимая  $i$ -ой главной компонентой  $Y_i$  равна  $\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^k \lambda_i}$ .

При условии, что  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k$  часть выборочной дисперсии, объяснимой  $m$  главными компонентами вычисляется, как

$$\frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{i=1}^k \lambda_i}. \quad (6)$$

Наша цель состоит в том, чтобы найти малое число главных компонент, объясняющих большую часть выборочной дисперсии. Иными словами, нужно найти как можно меньшее число  $m$ , чтобы соотношение (6) было близко к 1.

Замечание. Так как ковариационная матрица  $\Omega$  неизвестна будем использовать выборочную ковариационную матрицу  $S$ .

$$S = \frac{1}{n-1} (X - \bar{X})(X - \bar{X})^T = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)(X_i - \bar{X}_i)^T, \quad (7)$$

где  $X = [x_{ij}]$ ,  $i = \overline{1, k}$ ,  $j = \overline{1, n}$  - матрица, состоящая из случайных значений  $x_{ij}$  случайных переменных  $X_i$ . Так как  $S$  - симметрическая матрица, то имеет место аналогичное спектральное разложение

$$S = \sum_{j=1}^n \lambda_j B_j B_j^T, \quad (8)$$

где  $B_j = [b_{ij}]$  - единичные собственные векторы матрицы  $S$ , соответствующие собственным числам  $\lambda_j$  (не путать с собственными числами матрицы  $\Omega$ ).

Воспользуемся  $b_{ij}$ , как коэффициентами регрессии и выразим через них  $y_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j$ . Таким образом  $Y = B^T X$ . Аналогично  $D(y_i) = \lambda_i$ ,  $cov(y_i, y_j) = 0$ ,

$Sp(S) = \sum_{i=1}^k s_i^2 = \sum_{i=1}^k \lambda_i$ . Как и ранее, при условии, что  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k$ , цель состоит в

том, чтобы найти как можно меньшее число  $m$  главных компонент, объясняющих как можно большую долю общей дисперсии. Таким образом, будет снижено количество главных компонент нужных для объяснения большей части дисперсии данных.

Применим метод главных компонент для основных параметров исходной воды, которые ежемесячно (с 2002 по 2014 год) учитывались на предприятии при дезодорации воды и которые оказывают существенное влияние на ее органолептические свойства.

Исходные данные значений  $x_{ij}$  случайных переменных  $X_i$  приведены в приложении А. Проведем приведение значений случайных переменных к безразмерному виду, так как метод главных компонент очень чувствителен к абсолютным значениям переменных.

Применяя (9) получим значения случайных переменных в интервале  $[0;1]$ .

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}. \quad (9)$$

Результат приведен в приложении А.

Средние значения величин  $X_i$  приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Средние значения показателей качества воды, приведённых к безразмерному виду

Переменная	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
Среднее значение	0,328	0,602	0,560	0,098	0,469	0,417	0,195	0,466	0,465

Найдем выборочную ковариационную матрицу (таблица 2.4)

$$S = \frac{1}{n-1}(X - \bar{X})(X - \bar{X})^T = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)(X_i - \bar{X}_i)^T \quad \text{для матрицы}$$

$X = [\tilde{x}_{ij}], i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ , где  $X_i$  – вектор значений случайных переменных,  $\bar{X}_i$  - его среднее значение.

Таблица 2.4 – Выборочная ковариационная матрица показателей качества

ВОДЫ

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
$X_1$	0,067	0,035	0,021	0,001	-0,008	0,024	0,026	0,032	0,025
$X_2$	0,035	0,094	0,073	0,000	-0,004	0,010	0,000	0,015	0,012
$X_3$	0,021	0,073	0,065	-0,004	-0,006	0,003	-0,006	0,007	0,006
$X_4$	0,001	0,000	-0,004	0,089	-0,011	-0,008	0,008	0,002	0,018
$X_5$	-0,008	-0,004	-0,006	-0,011	0,050	-0,002	-0,020	-0,021	-0,030
$X_6$	0,024	0,010	0,003	-0,008	-0,002	0,034	0,021	0,021	0,007
$X_7$	0,026	0,000	-0,006	0,008	-0,020	0,021	0,055	0,041	0,034
$X_8$	0,032	0,015	0,007	0,002	-0,021	0,021	0,041	0,063	0,033
$X_9$	0,025	0,012	0,006	0,018	-0,030	0,007	0,034	0,033	0,074

В практических исследованиях предпочитают использовать вместо матрицы  $S$  корреляционную матрицу для выравнивания весов критериев.

Пусть  $R = [r_{ij}] = \frac{\text{cov}(x_i, x_j)}{S_i S_j}$  - матрица коэффициентов корреляции показате-

лей качества воды. В таблице 2.5 представлена матрица коэффициентов корреляции.

Таблица 2.5 – Матрица коэффициентов корреляции.

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
$X_1$	1	0,4364	0,3203	0,0074	-0,1374	0,5108	0,4325	0,4905	0,3591
$X_2$	0,4364	1	0,9422	0,0006	-0,0592	0,1848	-0,0030	0,1931	0,1378
$X_3$	0,3203	0,9422	1	-0,0590	-0,1002	0,0679	-0,1027	0,1099	0,0920
$X_4$	0,0074	0,0006	-0,0590	1	-0,1691	-0,1534	0,1147	0,0326	0,2223
$X_5$	-0,1374	-0,0592	-0,1002	-0,1691	1	-0,0479	-0,3792	-0,3728	-0,4910
$X_6$	0,5108	0,1848	0,0679	-0,1534	-0,0479	1	0,4785	0,4467	0,1485
$X_7$	0,4325	-0,0030	-0,1027	0,1147	-0,3792	0,4785	1	0,7006	0,5290
$X_8$	0,4905	0,1931	0,1099	0,0326	-0,3728	0,4467	0,7006	1	0,4869
$X_9$	0,3591	0,1378	0,0920	0,2223	-0,4910	0,1485	0,5290	0,4869	1

Определим собственные векторы и собственные значения матрицы  $R$ . Так как матрица  $R$  симметрическая, то можно воспользоваться методом вращений Якоби для нахождения собственных векторов и собственных значений (таблица 2.6). [77]

Таблица 2.6 – Собственные векторы и собственные значения матрицы  $R$

	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$
Собственное число	3,24	1,96	1,35	0,82	0,51	0,45	0,37	0,25	0,04
Собственный вектор	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	$B_8$	$B_9$
	0,41	0,14	-0,20	0,27	0,29	0,48	0,61	-0,06	0,05
	0,26	0,60	0,14	0,04	-0,05	-0,13	-0,12	-0,09	-0,71
	0,21	0,62	0,19	-0,11	-0,08	-0,13	-0,11	-0,09	0,69
	0,06	-0,16	0,56	0,76	-0,25	-0,03	-0,02	0,08	0,06
	-0,28	0,19	-0,42	0,52	0,52	-0,35	-0,21	0,00	0,07
	0,33	-0,01	-0,53	0,19	-0,45	0,30	-0,49	0,22	0,05
	0,42	-0,33	-0,11	0,04	-0,03	-0,32	-0,08	-0,77	0,03
	0,45	-0,16	-0,10	-0,07	-0,01	-0,61	0,28	0,55	0,01
	0,38	-0,20	0,32	-0,13	0,62	0,21	-0,49	0,18	0,01

Определим сумму долей накопленной выборочной дисперсии, определяемую главными компонентами. Доля общей дисперсии, определяемая главными компонентами, представлена в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Доля общей дисперсии, определяемая главными компонентами

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$
$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^k \lambda_i}$	0,360	0,218	0,149	0,092	0,056	0,050	0,041	0,028	0,005
$\sum_{i=0}^i \lambda_i$	0,360	0,578	0,728	0,819	0,876	0,926	0,967	0,995	1,000

По правилу Парето [153], были выделены четыре главные компоненты, формирующие 81,9% дисперсии данных ( $P_1 - 36,3\%$ ,  $P_2 - 21,82\%$ ,  $P_3 - 14,98\%$ ,  $P_4 - 9,2\%$ ).

В результате, согласно уравнению перехода к главным компонентам (10),

$$y_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j, \quad (10)$$

определим матрицу перехода к выбранным главным компонентам.

Таблица 2.8 - Коэффициенты главных компонент

Параметры исходной воды	Коэффициенты уравнения главных компонент			
	$P_1$ (36,03%)	$P_2$ (21,82%)	$P_3$ (14,94%)	$P_4$ (9,2%)
$X_1$	0,41	0,14	-0,20	0,27
$X_2$	0,26	0,60	0,14	0,04
$X_3$	0,21	0,62	0,19	-0,11
$X_4$	0,06	-0,16	0,56	0,76
$X_5$	-0,28	0,19	-0,42	0,52
$X_6$	0,33	-0,01	-0,53	0,19
$X_7$	0,42	-0,33	-0,11	0,04
$X_8$	0,45	-0,16	-0,10	-0,07
$X_9$	0,38	-0,20	0,32	-0,13

Перейдем к представлению данных через полученные главные компоненты. Данные преобразований приведены в приложении А.

Проведем анализ рассеивания данных по осям нового базиса (рис. 2.1 – 2.6).

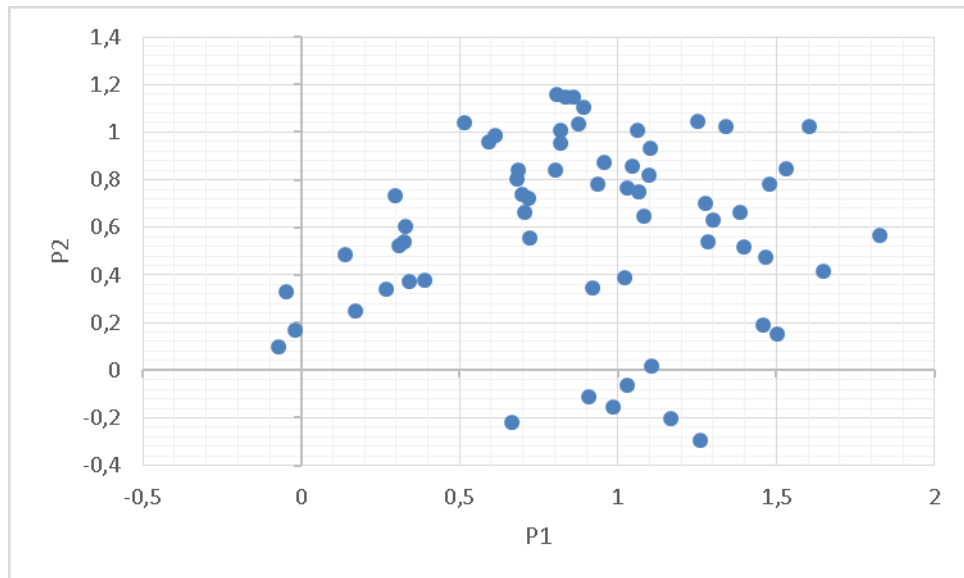


Рисунок 2.1 – Рассеивание данных в осях  $P_1$   $P_2$  главных компонент

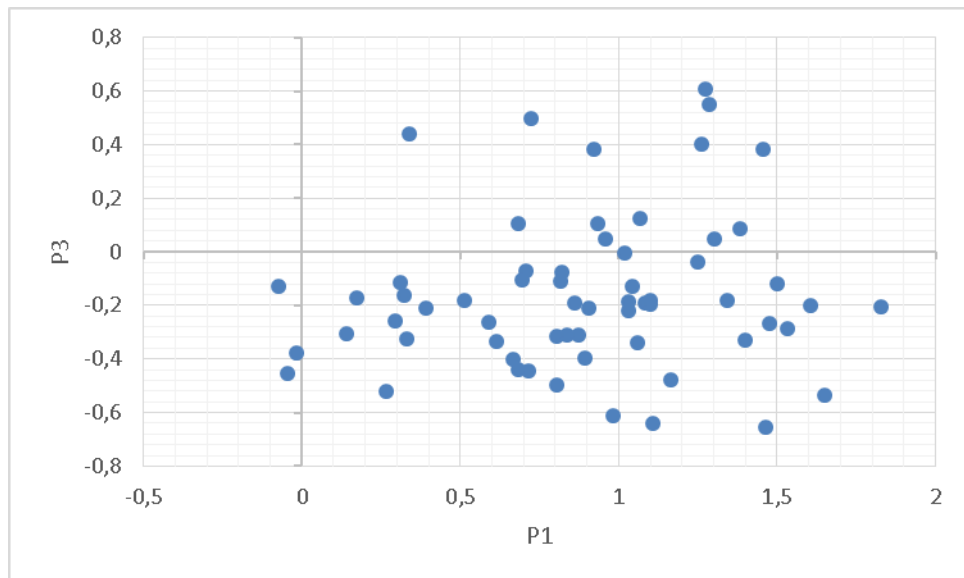


Рисунок 2.2 – Рассеивание данных в осях  $P_1$   $P_3$  главных компонент

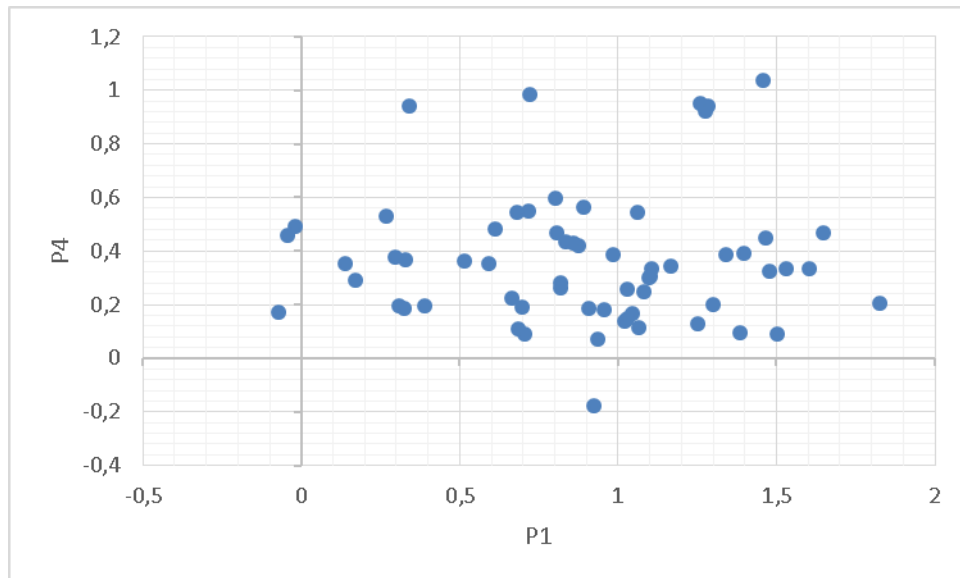


Рисунок 2.3 – Рассеивание данных в осях  $P_1$   $P_4$  главных компонент

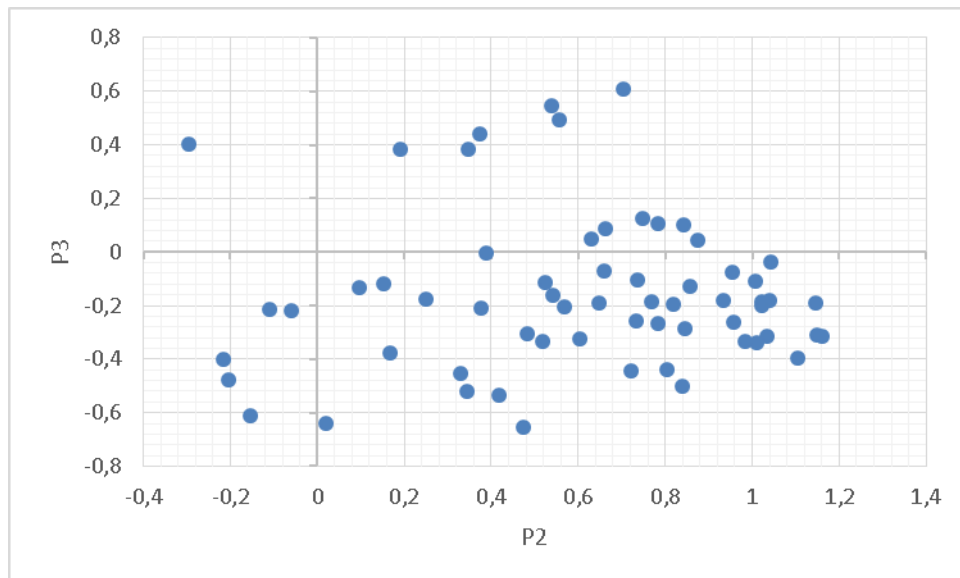


Рисунок 2.4 – Рассеивание данных в осях  $P_2$   $P_3$  главных компонент



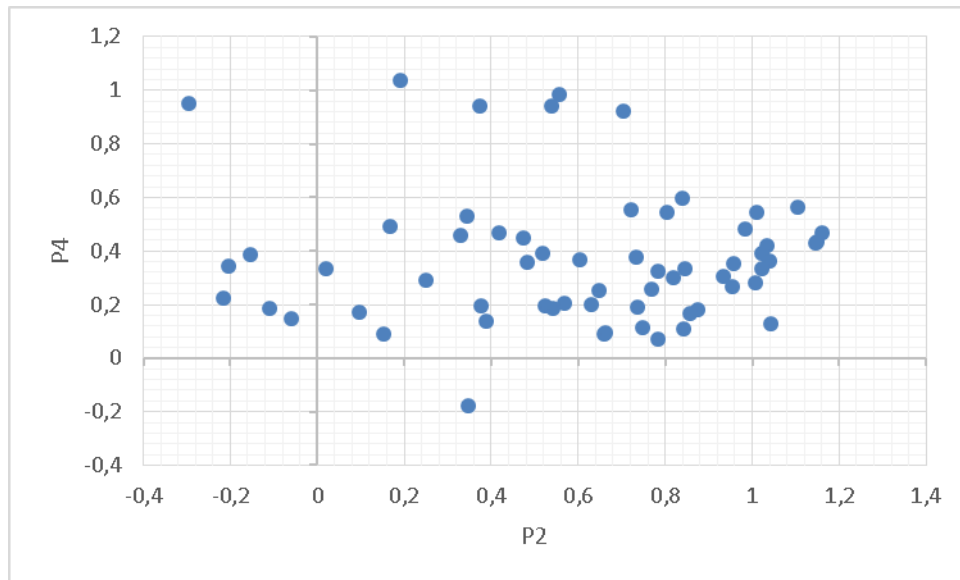


Рисунок 2.5 – Рассеивание данных в осях  $P_2$   $P_4$  главных компонент

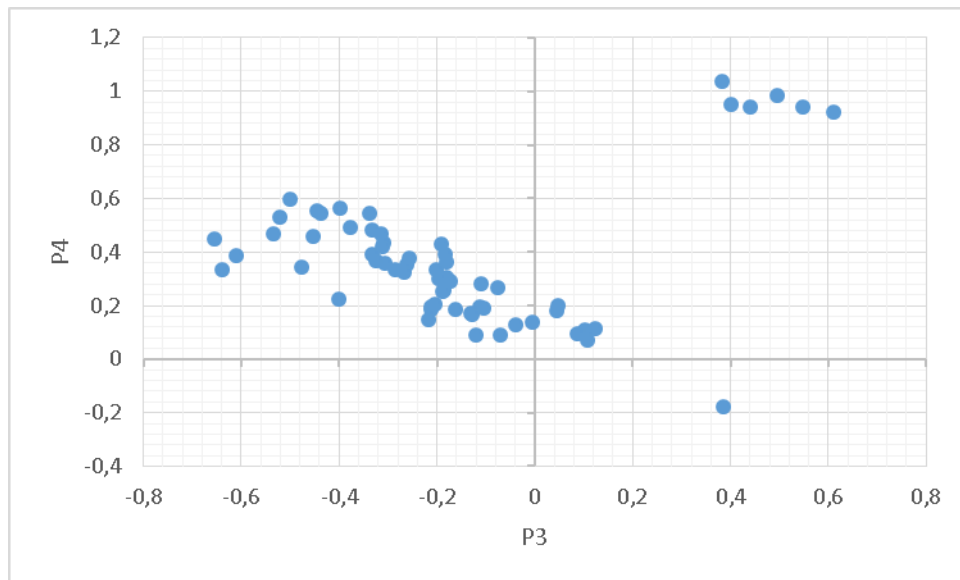


Рисунок 2.6 – Рассеивание данных в осях  $P_3$   $P_4$  главных компонент

Далее был проведен корреляционный анализ данных для трех главных компонент ( $P$ ) и параметров питьевой воды ( $Z$ ). Корреляционная связь была установлена для концентрации геосмина в питьевой воде,  $\text{мг/дм}^3$  ( $Z_2$ ); концентрации хлороформа,  $\text{мг/дм}^3$  ( $Z_3$ ); концентрации хлоридов,  $\text{мг/дм}^3$  ( $Z_4$ ). Результаты представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты корреляционного анализа для трех главных компонент и параметров питьевой воды

Параметры	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
$P_1$	1,00	-0,05	-0,47	-0,06	-0,48	0,51
$P_2$	-0,05	1,00	-0,13	0,62	0,12	0,16
$P_3$	-0,47	-0,13	1,00	-0,22	0,05	-0,97
$Z_2$	-0,06	0,62	-0,22	1,00	0,09	0,24
$Z_3$	-0,48	0,12	0,05	0,09	1,00	0,02
$Z_4$	0,51	0,16	-0,97	0,24	0,02	1,00

Концентрация геосмина ( $Z_2$ ) имеет корреляционную зависимость со второй главной компонентой ( $P_2$ ) (коэффициент корреляции 0,6).

Построим зависимости параметров чистой воды от главных компонент.

Упорядочим данные согласно возрастания главной компоненты  $P_2$  и построим зависимость концентрации геосмина.

Применяя метод наименьших квадратов [156], определяем параметры линии тренда (11) (рисунок 2.7 пунктирная линия). Достоверность 0,57.

$$y = 10^{-3}(-1,8x^5 + 4,2x^4 - 2,3x^3 - 0,03x^2 + 0,2x + 0,02) \quad (11)$$

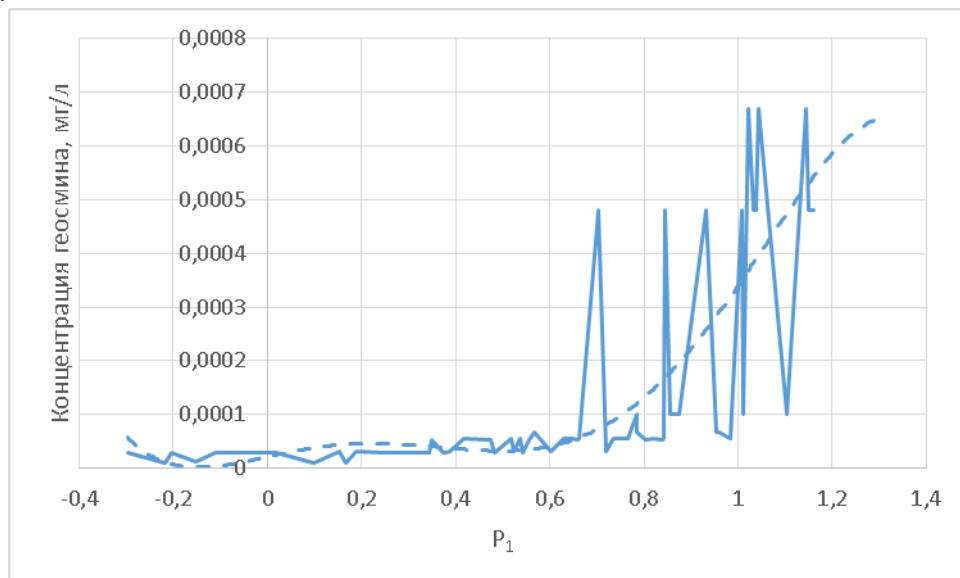


Рисунок 2.7 – Зависимость концентрации геосмина от  $P_2$

Концентрация хлороформа ( $Z_3$ ) имеет корреляционную зависимость с первой главной компонентой ( $P_1$ ) (коэффициент корреляции -0,6). Аналогично, упо-

рядочим данные согласно возрастания главной компоненты  $P_1$  и построим зависимость концентрации хлороформа от  $P_1$ .

Применяя метод наименьших квадратов, определяем параметры линии тренда (12) (рисунок 2.8 пунктирная линия). Коэффициент достоверности 0,49.

$$y = 0,36x^6 - 2,05x^5 + 4,36x^4 - 4,2x^3 + 1,7x^2 - 0,2x + 0,06 \quad (12)$$

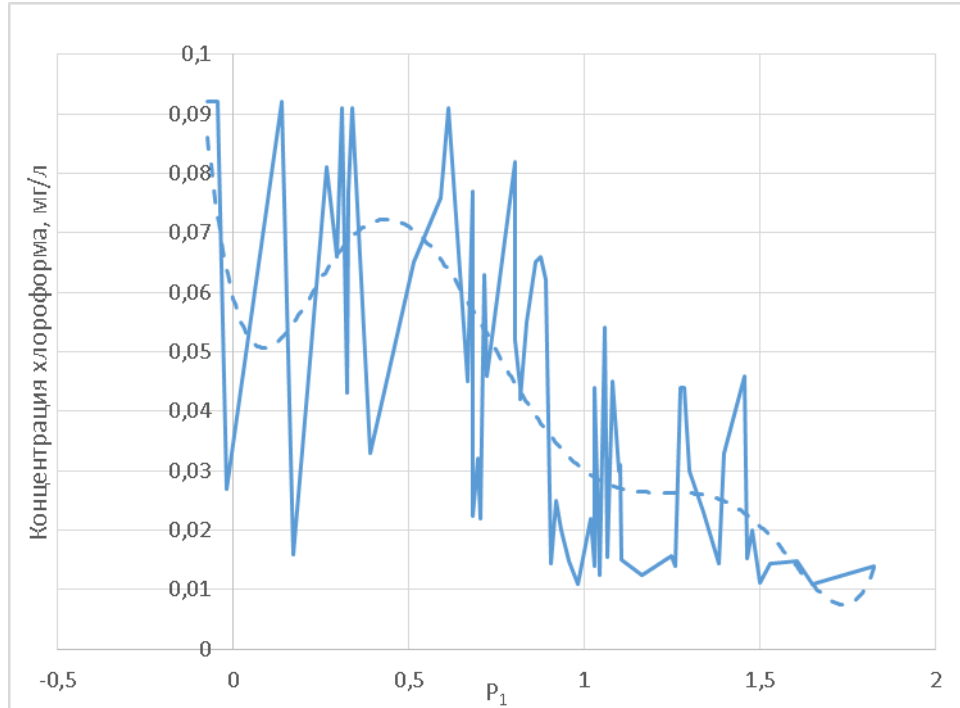


Рисунок 2.8 – Зависимость концентрации хлороформа от  $P_1$

Для концентрации хлоридов ( $Z_4$ ) выявлена корреляционная зависимость с первой ( $P_1$ ) и третьей ( $P_3$ ) главными компонентами (коэффициенты корреляции 0,5 и -0,9). Упорядочим данные по  $P_1$ .

В данном случае метод наименьших квадратов будем применять, согласно (13). [77]

$$F(\bar{X}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - A^T X_i + b_i)^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $y_i$  - зафиксированное значение концентрации хлоридов,  $\hat{y}_i = A^T X_i + b_i$  - модельное значение.  $X_i$  -  $i$ -я строка матрицы главных компонент  $P_1 P_3$ . Минимум (12) необходимо найти относительно неизвестных  $A$  и  $B = \{b_i\}, i = \overline{1, n}$ .

Применяя метод наименьших квадратов, определяем параметры линии тренда (14) (рисунок 2.9 пунктирная линия). Коэффициент достоверности 0,65.

$$y = 3,917x_1 - 5,397x_2 + 8,551 \quad (14)$$

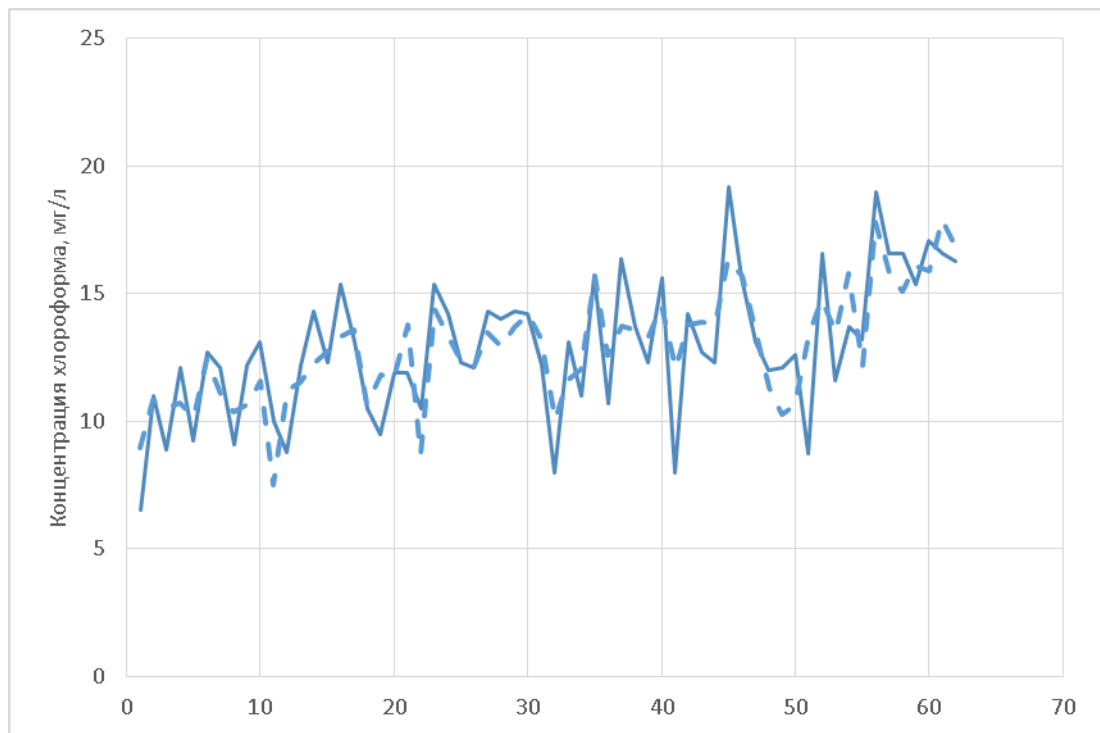


Рисунок 2.9 – Зависимость концентрации хлороформа от  $P_1$  и  $P_3$  (данные упорядочены по  $P_1$  в порядке возрастания)

Оценка полученных результатов. Выполняя вышеизложенные расчеты и сопоставляя диаграммы, построенные по экспериментальным точкам с моделями, следует учитывать расхождение экспериментальных и теоретически рассчитанных данных, как следствие из этого, нужно оценить погрешность расчетов, достоверность результатов и отклонение теоретических данных от практических.

Поэтому, для сравнения степени статистической зависимости между двумя переменными (моделью и экспериментальными значениями), а так же для сравнения их дисперсий, была проведена описательная статистика. Для определения значимых различий между групповыми средними в установке дисперсионного анализа были рассчитаны коэффициенты Фишера (для геосмина, хлоридов и хлороформа), для статистической зависимости между двумя числовыми переменными были рассчитаны коэффициенты корреляции, кроме того был проведен двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями для оценки отклонения экспери-

ментальных и значений полученных путем математического моделирования. Полученные результаты по описательной статистике представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты математической описательной статистики

Показатели	Параметры	Эксперимент	Модель
Геосмин	Среднее	0,0001	0,0003
	Стандартная ошибка	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$2,94 \cdot 10^{-5}$
	Стандартное отклонение	0,0002	0,0002
	Дисперсия выборки	$4,11 \cdot 10^{-8}$	$5,34 \cdot 10^{-8}$
	Уровень надежности (95,0%)	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$5,87 \cdot 10^{-5}$
Хлориды	Среднее	12,90	12,89
	Стандартная ошибка	0,34	0,34
	Стандартное отклонение	2,71	2,64
	Дисперсия выборки	7,34	6,95
	Уровень надежности (95,0%)	0,688	0,67
Хлороформ	Среднее	0,041	0,04
	Стандартная ошибка	0,003	0,003
	Стандартное отклонение	0,026	0,022
	Дисперсия выборки	0,0007	0,0004
	Уровень надежности(95,0%)	0,007	0,005

Для сравнения дисперсий двух вариационных рядов, то есть для определения значимых различий между групповыми средними в установке дисперсионного анализа воспользуемся коэффициентом Фишера [36, 56].

Используем формулу (15) для расчета коэффициента Фишера:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad (15)$$

где  $\sigma_1^2$  - большая дисперсия,  $\sigma_2^2$  - меньшая дисперсия.

Если вычисленное значение критерия  $F$  больше критического для определенного уровня значимости и соответствующих чисел степеней свободы для числителя и знаменателя, то дисперсии считаются различными [36, 53]. В данном случае критерий Фишера можно рассчитать разделив большее значение дисперсии выборки на меньшее. В нашем случае критерий Фишера:

- для геосмина равен 1,30;

- для хлоридов равен 1,05;
- для хлороформа равен 1,72.

Для достоверности расчетов коэффициент критерия Фишера должен быть не выше 2,97 [36, 125] (если критерий Фишера более 2,97 - значит выборки не входят в одну генеральную совокупность), другими словами полученные результаты являются достоверными и находятся в установленных пределах.

Так же для расчета степени статистической зависимости между двумя числовыми переменными следует рассчитать коэффициент корреляции [36, 56, 125]. Он вычисляется следующим образом:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y}, \quad (16)$$

где

$n$  – количество наблюдений;

$x$  – входная переменная;

$y$  – выходная переменная.

В данном случае коэффициенты корреляции:

- для геосмина равен 0,81;
- для хлоридов равен 0,97;
- для хлороформа равен 0,76;

следует, что для достоверности расчетов коэффициент корреляции должен быть выше |0,5|, в нашем случае это условие выполняется [36, 125].

Кроме того, следует оценить отклонения экспериментальных и модельных значений. Для этого следует определить коэффициент Стьюдента (при этом уровень значимости берем 0,05), а так же ввести коэффициент  $p$ , в результате расчетов значения которого должны быть выше уровня значимости.

Исходя из вышесказанного, проведем двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями.

Полученные результаты представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 - Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями

Вещество	Параметры	Эксперимент	Модель
Геосмин	Среднее	0,0001	0,0003
	Дисперсия	$4,11 \cdot 10^{-8}$	$5,34 \cdot 10^{-8}$
	Наблюдения	62	62
	t-статистика	-4,74	-4,74
	p(T<=t) двухстороннее	$6,03 \cdot 10^{-6}$	$6,03 \cdot 10^{-6}$
	t критическое двухстороннее	1,98	1,98
Хлориды	Среднее	12,90	12,89
	Дисперсия	7,34	6,96
	Наблюдения	62	62
	t-статистика	0,02	0,02
	p(T<=t) двухстороннее	0,98	0,98
	t критическое двухстороннее	1,97	1,97
Хлороформ	Среднее	0,04	0,04
	Дисперсия	0,0007	0,0004
	Наблюдения	62	62
	t-статистика	0,05	0,05
	p(T<=t) двухстороннее	0,96	0,96
	t критическое двухстороннее	1,98	1,98

Для достоверности расчетов коэффициент Стьюдента (в данном случае это t-статистика) должен быть меньше значения t-критического двухстороннего [36, 107]. Как видно из таблицы для всех параметров это условие соблюдается, т.е. отклонение значений математической модели находится в пределах допустимого, а это значит, что полученные результаты являются верными.

Оценка полученных результатов. На основе результатов корреляционного анализа данных была доказана высокая эффективность работы МУП «Ижводоканал» как по процессу дезодорации, так и по очистке воды в целом. Было установлено, что параметры питьевой воды не только укладываются в установленные нормы [43, 44, 45, 124] с большим запасом, но и большинство из них не зависят от параметров прудовой воды (слабая степень корреляционной связи, либо ее отсутствие).

Для параметров, у которых значения коэффициентов корреляции выше 0,5, были разработаны регрессионные уравнения и откуда получены значения, для оптимизации процесса в будущем. Результаты регрессионного моделирования были

доказаны при помощи математической описательной статистики, коэффициента Фишера, коэффициента корреляции, двухвыборочного *t*-теста.

### 2.3. Расход ПАУ относительно концентрации геосмина в системе питьевого водоснабжения

Как видно из таблицы, после каждой сезонной очистки питьевой воды от одорирующих веществ, остается большое количество адсорбента (порядка нескольких тонн), причем разных марок. Не смотря на эффективность работы предприятия, которая была доказана в предыдущем пункте при помощи корреляционного анализа, сам процесс дезодорации не оптимизирован: наличие больших остатков активированного угля разных марок свидетельствуют об этом (таблица 2.12) [138].

Таблица 2.12 – Остаток активированного угля на МУП «Ижводоканал» за период с 2004 по 2013 год

год	Марка активированного угля	Остаток на следующий год (тонн)
2004	ОУ-В	21,035
2005	ОУ-В	13,647
2006	ОУ-В	11,344
2007	ОУ-В	7,800
2008	ОУ-А	3,125
2009	ОУ-В	3,012
2010	ОУ-А	9,035
2011	ОУ-В	4,225
2012	ОУ-В	3,312
2013	ОУ-В	5,155

Представляется актуальным проведение расчетов для определения оптимального расхода адсорбента. Расход активированного угля рассмотрен на примере технологического процесса дезодорации воды от одорирующего вещества геосмин. Данное вещество выбрано не случайно: как известно в 2002-2004 в г.



Ижевске одним из важных вопросов были жалобы потребителей на органолептические свойства питьевой воды, которые возникали в теплые периоды времени (май-сентябрь) и причиной которых являются повышенная концентрация геосмина [89, 113, 138].

Исходя из вышесказанного, проведем расчет для расхода адсорбента на примере удаления из питьевой воды одорирующего вещества геосмин. Для аналитического описания адсорбции используется уравнение Ленгмюра [86 - 88] :

$$A = A_{np} \frac{kC}{1+kC} \quad (17)$$

где:

$A$  – удельная адсорбция;

$A_{np}$  – предельная адсорбция;

$C$  – равновесная концентрация адсорбата;

$k$  – адсорбционная константа.

Учитывая рассчитанные константы для уравнения Ленгмюра при адсорбции геосмина порошкообразным активированным углем [107]:

$$A_{np} = 1,707, \text{ ммоль/г};$$

$$k = 14,288.$$

Запишем уравнение Ленгмюра с использованием данных констант для геосмина:

$$A = 1,707 \frac{14,288C}{1+14,288C}. \quad (18)$$

Рассчитаем массу активного угля. Исходные данные концентраций геосмина взяты за 2003-2005 год (август-сентябрь) [138], когда концентрация данного вещества превышала предел при котором наступает проявление органолептических свойств (0,000001 мг/л) [135] (таблица 2.13).

Таблица 2.13 – Данные по геосмину за 2003-2004 год для МУП «Ижводоканал»:

Забор пробы	Концентрация, мг/л	год
Пруд	0,00067	2003
	0,000034	2004
	0,000037	2005
Выход из РЧВ	0,00048	2003
	0,0001	2004
	0,000068	2005

Рассмотрим несколько концентраций вещества:

1. Концентрация, при которой наступает проявление органолептических свойств в воде 0,001мкг – 0,02мкг – (0,000001-0,00002 мг/л).

2. Нижний предел определения, при котором наступает проявление органолептических свойств 0,0002 мкг – 0,03 мкг (0,0000002-0,00002 мг/л).

Проведем расчет для концентраций геосмина в питьевой воде на данных за 2003 год.

Выберем 0,001мкг (0,000001 мг/л ) концентрацию при которой наступает проявление органолептических свойств в воде ( от 1 балла и более). Воспользуемся уравнением Ленгмюра (19) и найдем значение адсорбции, соответствующее необходимому значению остаточной концентрации геосмина в растворе:

$$A = \frac{1,707 \cdot 14,288 \cdot 0,00549 \cdot 10^{-9}}{1 + 14,288 \cdot 0,00549 \cdot 10^{-9}} = 0,13389 \cdot 10^{-9} \text{ ммоль / мг} . \quad (19)$$

Для определения массы необходимого адсорбента воспользуемся зависимостью [83, 84]:

$$m = \frac{(C_{исх} - C_{очм})V}{A}, \quad (20)$$

где

$m$  – масса активированного угля затрачиваемого на очистку;

$C_{исх}$  – концентрация дезодорирующего вещества в исходной воде;

$C_{очм}$  – концентрация дезодорирующего вещества в очищенной воде;

$V$  – объем раствора;

$A$  удельная – адсорбция.

Подставим полученные ранее значения:

$$m = \frac{(3,6813 - 0,00549) \cdot 10^{-9} \cdot 1}{0,13389 \cdot 10^{-9}} = 27 \text{ мг} . \quad (21)$$

Расход активированного угля для одного кубического метра воды 27 мг/дм<sup>3</sup>.

Теперь проведем расчет для нижнего предела концентрации, при котором наступает проявление органолептических свойств в воде (0,0002 мкг (0,0000002 мг/л)) в баллах: от 0 до 1 балла.

Для этого найдем значение адсорбции воспользовавшись уравнением Ленгмюра (18), соответствующее необходимому значению остаточной концентрации геосмина в растворе:

$$A = \frac{1,707 \cdot 14,288 \cdot 0,00109 \cdot 10^{-9}}{1 + 14,288 \cdot 0,00109 \cdot 10^{-9}} = 0,02658 \cdot 10^{-9} \text{ ммоль/ мг} . \quad (22)$$

Найдем массу необходимого адсорбента используя зависимость (20):

$$m = \frac{(3,6813 - 0,00109) \cdot 10^{-9} \cdot 1}{0,02658 \cdot 10^{-9}} = 138 \text{ мг} . \quad (23)$$

Расход активированного угля для одного кубического метра воды 138 мг/дм<sup>3</sup>.

Аналогичным образом по формулам (18, 20) проведем расчеты для концентраций геосмина и расхода активированного угля затрачиваемого на очистку воды на 2004 и 2005 год. Сравним полученные результаты со средними фактическими значениями. Результаты расчетов приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 Результаты расчета для расхода активированного угля затрачиваемого на очистку воды от геосмина на 2003-2005 год

Год	Для концентрации геосина в первом случае	Для концентрации геосина во втором случае	Среднее фактическое значение
2003	27	138	4,1
2004	1,3	6,9	4,878
2005	1,47	7,5	2,3

При верхнем пределе концентрации геосмина ( $0,001\text{мкг}$  ( $0,000001\text{ мг/л}$ )), при котором наступает проявление органолептических свойств в воде (от 1 балла и более), на примере МУП «Ижводоканал» был рассчитан оптимальный расход активированного угля и для 2003 года составил  $27\text{ мг/дм}^3$ , для 2004 –  $1,3\text{ мг/дм}^3$ , а для 2005 –  $1,47\text{ мг/дм}^3$ . При нижнем пределе концентрации геосмина ( $0,0002\text{ мкг}$  ( $0,0000002\text{ мг/л}$ )), при котором проявление органолептических свойств составляет от 0 до 1 балла, так же был рассчитан оптимальный расход, он составил для 2003 года  $138\text{ мг/дм}^3$ , для 2004 –  $6,9\text{ мг/дм}^3$ , для 2005 –  $7,5\text{ мг/дм}^3$ . На основе полученных результатов построим график зависимости массы угля, требуемой для очистки, от степени концентрации геосмина в уже очищенной воде (рисунок 2.10).

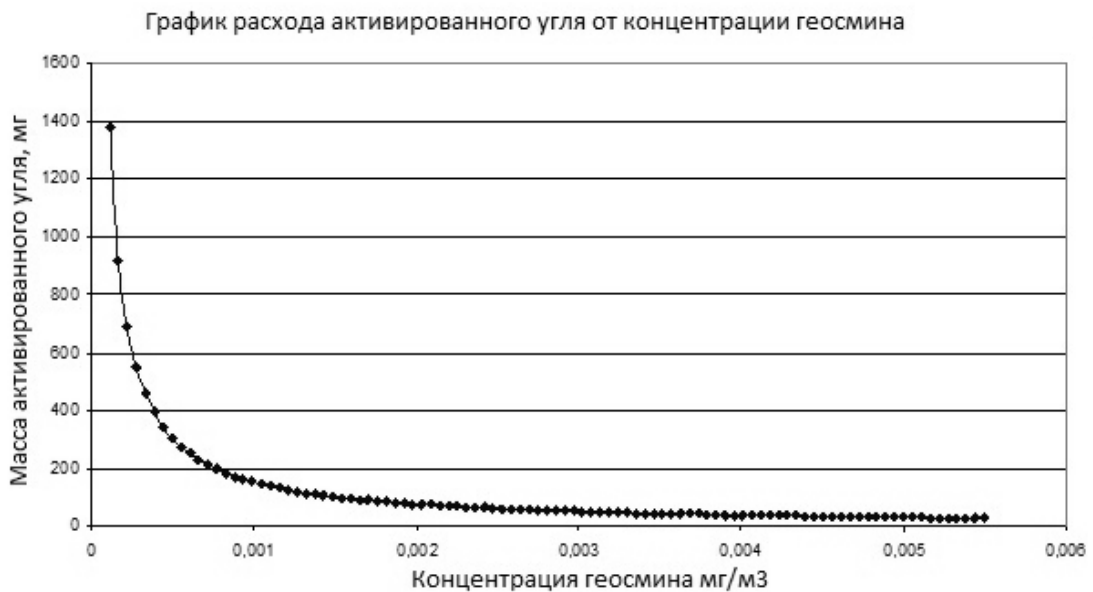


Рисунок 2.10 – Зависимость концентрации геосмина в питьевой воде от массы активированного угля применяемого для ее очистки на МУП «Ижводоканал»

Как видно из графика, для уменьшения концентрации геосмина в питьевой воде требуется большее количество АУ, однако, эта зависимость не линейная.

Можно сказать, что применение активированного угля для полного удаления геосмина является нецелесообразным в силу больших расходов адсорбента.

## Выводы по главе

1. Рассмотрено влияние сине-зеленых водорослей водоисточника на органолептические свойства питьевой воды. В качестве решения риска проявления негативных органолептических свойств в питьевой воде (баллы), связанных с неконтролируемым ростом сине-зеленых водорослей, был разработан и предложен способ оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме (1).

2. При помощи корреляционного анализа была доказана высокая эффективность работы предприятия по очистке питьевой воды: было установлено, что корреляционная зависимость между параметрами исходной и питьевой воды практически отсутствует, либо очень слабая (коэффициенты корреляции меньше 0,5).

3. При помощи корреляционного и регрессионного анализа была разработана модель для концентраций геосмина, хлоридов и хлороформа в питьевой воде (11,12,14). По данным уравнениям были получены значения на период с 2002 по 2014 годы и проведен сравнительный анализ с фактическими концентрациями веществ. Достоверность результатов и работоспособность модели была доказана при помощи математической описательной статистики и критерия Фишера (для геосмина – 1,22, хлоридов – 1,04, хлороформа – 1,28), коэффициента корреляции (для геосмина – 0,83, хлоридов – 0,96, хлороформа – 0,84), а так же двухвыборочного t-теста с различными дисперсиями. Полученные уравнения могут быть использованы для прогноза данных веществ (геосмина, хлороформа и хлоридов) в будущем.

4. Была выявлена зависимость расхода адсорбента от концентрации геосмина. При верхнем пределе концентрации геосмина (0,001мкг (0,000001 мг/л) ), при котором наступает проявление негативных органолептических свойств в воде (от 1 балла и более), на примере МУП «Ижводоканал» был рассчитан оптимальный расход активированного угля и для 2003 года составил 27 мг/дм<sup>3</sup>, для 2004 - 13 мг/дм<sup>3</sup>, а для 2005 – 1,47 мг/дм<sup>3</sup>. При нижнем пределе концентрации геосмина (0,0002 мкг (0,0000002 мг/л)), при котором наступает проявление органолептических свойств в воде (в баллах от 0 до 1) , так же был рассчитан оптимальный рас-

ход, он составил для 2003 года  $138 \text{ мг/дм}^3$ , для 2004 -  $6,9 \text{ мг/дм}^3$ , для 2005 -  $7,5 \text{ мг/дм}^3$ . Как видно из полученных результатов, оптимальный расход адсорбента в некоторых случаях (особенно для нижнего предела концентрации геосмина ( $0,0002 \text{ мкг}$  ( $0,0000002 \text{ мг/л}$ ))) не рентабелен вследствие высоких затрат.

Исходя из вышесказанного, актуальным представляется разработка модели для определения совокупности параметров адсорбента (дозировка, адсорбционная активность рассчитанная из соотношения марок угля, а так же время контакта с очищаемой водой) при процессе дезодорации на основе ряда основных показателей исходной воды. Причем нормативы для показателей питьевой воды [124] следует рассматривать как обязательное условие при разработке данной модели. В качестве одного из оптимальных методов при разработке модели можно рассматривать нейронную сеть на основе многослойного персептрона, данная концепция будет рассмотрена в следующей главе.

## **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ИНС ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ**

### **3.1. Обоснование применения ИНС глубокого обучения с сигмоидальной функцией активации к решению проблемы дезодорации воды**

Исходя из исследований за последний десяток лет в области системного анализа, автоматизации, управления и обработки информации, математического моделирования [30, 67, 123, 140, 151] особый интерес представляет применение новой прикладной области науки о данных, которая специализируется на интеллектуальной поддержке и искусственных нейронных сетях. Актуальность применения методов на основе искусственных нейронных сетей доказана многочисленными примерами: распознавание образов, интеллектуализация технологических процессов, управление с последующей адаптацией, прогнозирование с использованием обучения, организация памяти и многое другое. Возможность применения ИНС в различных областях на производствах (например, таких как технологический процесс водоочистки) представляет огромный интерес для науки. С помощью методов на основе ИНС возможно производить распознавание объектов окружающей среды на программном уровне, визуализировать оптические сигналы, разрабатывать самообучающиеся системы, распознавать речь, возможно использовать в исследовании скважин нефтяных месторождений, предсказывать изменения биржевого рынка и решать другие задачи [17, 63, 99, 120, 126, 137].

Круг задач, для решения которых используются нейронные сети, во многом совпадает с задачами, решаемыми традиционными статистическими методами [20, 90, 91]. Нейронная сеть создается путем указания вида структуры, числа слоев и числа нейронов в каждом слое.

Для распространения входящих сигналов применялась формула (24) [91, 122]:

$$X = WI, \quad (24)$$

где

$W$  - матрица весов;

$I$  – матрица входных сигналов;

$X$  – результирующая матрица для нейронов скрытого слоя.

В матричной форме для нейронной сети с одним скрытым слоем и двумя входящими сигналами (в более подробной форме) это выглядит как (25):

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{11} & w_{21} & w_{31} \\ w_{12} & w_{22} & w_{32} \\ w_{13} & w_{23} & w_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

где  $w$  – вес одной связи нейронной сети между слоями,  $I_1, I_2, I_3$ , – входной сигнал (*Input*),  $x$  – сигнал, поступающий на каждый нейрон слоя.

Для нейронной сети с двумя входными сигналами и двумя нейронами пример обратного распространения ошибки будет выглядеть как [122]:

$$E = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{w_{11}}{w_{11} + w_{21}} & \frac{w_{12}}{w_{12} + w_{22}} \\ \frac{w_{21}}{w_{21} + w_{11}} & \frac{w_{22}}{w_{22} + w_{12}} \end{pmatrix}, \quad (26)$$

где  $E$  общая ошибка слоя,  $e$  – ошибка каждого нейрона скрытого слоя. Обновление весовых коэффициентов в зависимости от ошибки [90, 122]:

$$\frac{dE}{dw_{jk}} = -(t_k - o_k) \frac{1}{1 + e^{\sum_j w_{jk} o_j}} \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{\sum_j w_{jk} o_j}} \right) o_j, \quad (27)$$

где  $t_k$  – фактическое значение, которое соответствует выходу нейронной сети (в нашем случае рассматриваются три параметра фактических значений: дозирование сорбента, адсорбционная активность, время контакта сорбента с водой),  $o_k$  – выходной сигнал (*output*) нейронной сети (для указанных ранее трех параметров)  $w_{jk}$  – весовые значения связей нейронной сети  $o_j$  – выходной сигнал скрытого слоя. На рисунке 3.1. представлена графическая схема нейронной сети с одним



скрытым слоем и двумя сигналами входа и выхода с применяемыми переменными из формулы (27).

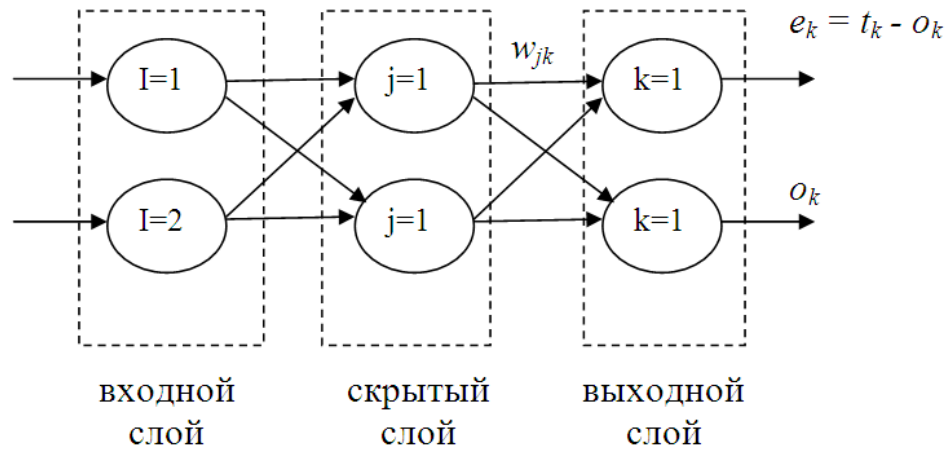


Рисунок 3.1. Графическая схема нейронной сети с одним скрытым слоем и двумя сигналами входа и выхода.

Формула (27) обусловлена применением в разрабатываемой нейронной сети с сигмоидальной функции активации. Следует особую роль уделить выбору функции активации при разработке нейросети для процесса дезодорации воды на СПО «Пруд-Ижевск». Рассмотрим более подробно несколько функций активации. В таблице 3.1 представлены наиболее популярные функции активации нейронов [90, 91].

Таблица 3.1 – Наиболее популярные функции активации нейронных сетей и области их значений

Название	Формула	Область значений
Линейная	$f(s) = ks$	$(-\infty, \infty)$
Полулинейная	$f(s) = \begin{cases} ks & s > 0 \\ 0, & s \leq 0 \end{cases}$	$(0, \infty)$
Логистическая (сигмоидальная)	$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-as}}$	$(0, 1)$
Гиперболический тангенс (сигмоидальная)	$f(s) = \frac{e^{as} - e^{-as}}{e^{as} + e^{-as}}$	$(-1, 1)$

Продолжение таблицы 3.1

Экспоненциальная	$f(s) = e^{-as}$	$(0, \infty)$
Синусоидальная	$f(s) = \sin(s)$	$(-1, 1)$
Сигмоидальная (рациональная)	$f(s) = \frac{s}{a +  s }$	$(-1, 1)$
Шаговая (линейная с насыщением)	$f(s) = \begin{cases} -1 & s \leq -1 \\ s & -1 < s < 1 \\ 1 & s \geq 1 \end{cases}$	$(-1, 1)$
Пороговая	$f(s) = \begin{cases} 0 & s < 0 \\ 1 & s \geq 0 \end{cases}$	$(0, 1)$
Модульная	$f(s) =  s $	$(0, \infty)$
Знаковая (сигнатурная)	$f(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ -1 & s \leq 0 \end{cases}$	$(-1, 1)$
Квадратичная	$f(s) = s^2$	$(0, \infty)$

На рисунке 3.2 представлены функции единичного скачка, гистерезиса, логистической функции и гиперболического тангенса.

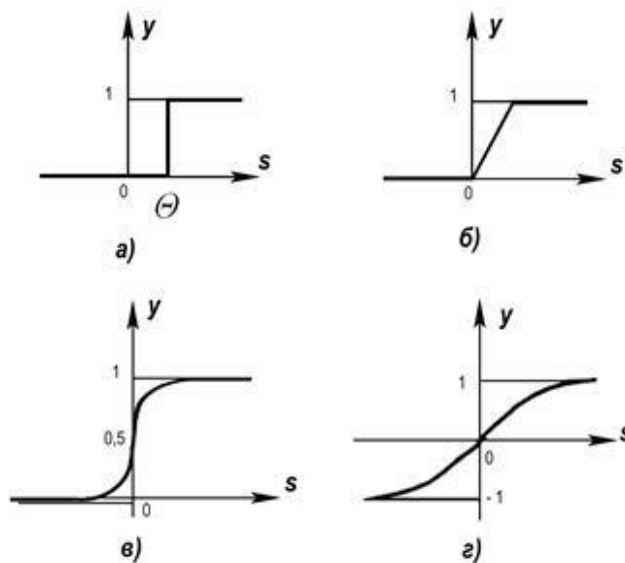


Рисунок 3.2 – Наиболее популярные функции активации: а – функция единичного скачка; б – линейный порог (гистерезис); в – логистическая функция; г – гиперболический тангенс.

Как видно из таблицы 3.1 и рисунка 3.2 наиболее подходящим к решению проблемы дезодорации питьевой воды и вопросам использования сорбента (акти-

вированного угля) будет применение при разработке искусственной нейронной сети для данного предприятия сигмоидальной или так называемой логистической функции (функция S-образного вида) активации (28) [90,91].

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (28)$$

Обоснованием данного выбора служит в первую очередь то, что функция дифференцируема. Данное свойство очень удобно использовать при обучении нейронной сети. Во-вторых, обладает свойством усиливать слабые сигналы, возможностью предотвращать «переобучение» от больших значений сигналов, так как они соответствуют областям, где сигмоидальная функция имеет достаточно пологий наклон [91]. Область значений от 0 до 1 является также большим преимуществом. На рисунке 3.3 представлен пример нейронной сети с сигмоидальной функцией активации  $f(s)$  с значениями параметров исходной воды в качестве входного сигнала ( $I_n$ ) и значениями параметров сорбента в качестве исходящего сигнала ( $O_n$ )

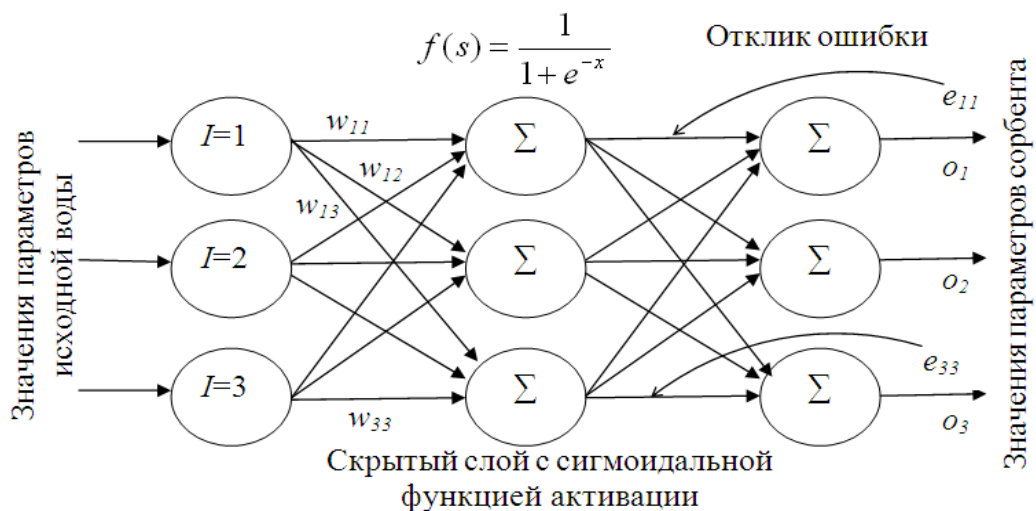


Рисунок 3.3 – Нейронная сеть с сигмоидальной функцией активации  $f(s)$  с значениями параметров исходной воды в качестве входного сигнала ( $I_n$ ) и значениями параметров сорбента в качестве исходящего сигнала ( $O_n$ )

Задачи, которые возможно решить с использованием ИНС - достаточно обширны и это не позволяет на сегодняшний день создать универсальные нейросе-

ти. Поэтому для каждой проблемы нужно разрабатывать определенные, специализированные ИНС, функционирующие по различным алгоритмам. [65, 118, 119].

Исходя из всего вышесказанного, нейронная сеть наиболее оптимально подходит для моделирования процесса дезодорации воды. Для проведения исследований была выбрана нейронная сеть глубокого обучения с использованием многослойного персептрона.

Входящий сигнал в данных ИНС распространяется от одного слоя к другому (следующему) слою. ИНС с использованием многослойного персептрона состоит из следующих элементов [5, 98, 132]:

- множество входящих сигналов, формирующих входящий слой ИНС (*input*);
- скрытые слои ИНС с функцией активации;
- выходной слой (*output*) с одним исходящим сигналом.

Кроме того, многослойный персептрон обладает несколькими свойствами, которые наиболее оптимально подходят для моделирования процесса дезодорации: во-первых каждый нейрон сети имеет нелинейную функцию активации, во-вторых многослойный персептрон содержит один или несколько слоев скрытых нейронов, не являющихся частью входа или выхода сети (эти нейроны позволяют сети обучаться решению сложных задач, последовательно извлекая наиболее важные признаки из входного образа) и в-третьих обладает высокой степенью связности, реализуемой посредством синаптических соединений (свойство высокой связности) [19, 20, 26, 97]. Комбинация всех этих свойств наряду со способностью к обучению на собственном опыте обеспечивает вычислительную мощь многослойного персептрона. Поэтому, моделирование процесса дезодорации при помощи нейронных сетей глубинного обучения (с использованием многослойного персептрона) является наиболее оптимальным из всех возможных способов.

### 3.2. Разработка модели ИНС для основных значений параметров дезодорации воды

#### Выбор параметров

В качестве примера использования нейронных сетей в моделировании параметров процесса дезодорации используем выборку из 62 данных с 2003 по 2012 год, сформированных на основе данных МУП «Ижводоканал» (Приложение А, Б, В) [138, 139]. Данные были собраны за каждый месяц когда применялся активированный уголь. Для реализации поставленной задачи воспользуемся программным пакетом *Excel Neural Package* [55, 78, 141] и построим сеть, анализирующую наши данные и формирующую связь между показателями прудовой воды (входные параметры модели) и дозировкой активированного угля при дезодорации (выход модели). *Excel Neural Package* реализует распространенную архитектуру нейронной сети.

Количество точек было сформировано по данным предприятия (выборка формировалась с 2002 по 2014 год), выборка ограничена лабораторными исследованиями предприятия и применением сорбентов в определенное время года, это отмечено в тексте диссертации. Количество точек ограничено данными предприятия и проводимых на нем лабораторных исследований. Большее количество точек позволит лучше обучить ИНС, однако и выбранное количество точек достаточно для обучения ИНС, что и было доказано в работе при помощи сравнения фактических и промоделированных результатов, проведенной оценки достоверности полученных результатов.

Для обучения используются модификации алгоритма обратного распространения ошибки – *Backpropagation Algorithm* или коротко – *BackProp* [55, 141]. Первый этап – обучение ИНС. На этом этапе происходит обучение нейросети на нашем наборе данных. В результате сеть должна построить аппроксимацию многомерных данных с заданной нами точностью, автоматически подбирая свои внутренние параметры - веса нейронов. В качестве входных параметров были выбраны следующие: органолептические свойства прудовой воды, баллы; темпе-

ратура воды, градусы; температура окружающей среды, градусы; фенольный индекс; концентрация хлоридов, мг/дм<sup>3</sup>; биологическое потребление кислорода, мг/дм<sup>3</sup>; концентрация сине-зеленых водорослей тыс.кл/мл; мутность, мг/л; цветность, градусы.

В качестве выходного параметра были выбраны основные параметры дезодорации питьевой воды, а именно: среднее значение дозы активированного угля, адсорбционная активность, время контакта адсорбента с водой. Адсорбционная активность смеси марок активированного угля рассчитывалась из процентного соотношения годового расхода угля в тоннах (дезодорация активированным углем производилась только в теплые периоды времени). Для марок активированного осветляющего древесного порошкообразного угля ОУ-А и ОУ-Б адсорбционная активность по индикатору метиленовому синему в миллиграммах на один грамм продукта была взята из ГОСТ 4453-74, а для ОУ-В данный показатель был взят из экспериментальных расчетов [84, 85] (в ГОСТ 4453-74 данный показатель для ОУ-В не нормируется). Параметры чистой воды рассматривались как обязательное условие, в таблице 3.2 приведены показатели, характеризующие предельные концентрации основных веществ, влияющих на качество воды. За основу был взят перечень, приведенный в СанПиН 2.1.4.1074-01. Этот список был также дополнен несколькими важными неорганическими элементами, не нормируемыми в России (по крайней мере, напрямую), но играющими большую роль при водоподготовительных мероприятиях (таблица 3.2). Некоторые из величин указанных в скобках, в таблицах 3.2-3.4 могут быть установлены по указанию Главного государственного санитарного врача. Прочерк - данный параметр не нормируется.

Таблица 3.2 – Требования к качеству питьевой воды

Показатель	Ед. измерения	Норм. ПДК, не более	Показ. вредн.	Класс опасн.
Водородный показатель	ед. рН	в пределах 6-9	-	-
Общая минерализация (сухой остаток)	мг/л	1000 (1500)	-	-
Жесткость общая	мг-экв/л	7,0 (10)	-	-
Окисляемость перманганатная	мг О <sub>2</sub> /л	5	-	-

Продолжение таблицы 3.2

Показатель	ед. изм.	норм. ПДК, не более	показ. вредн.	класс опасн.
Нефтепродукты, суммарно	мг/л	0,1	-	-
Поверхностно-активные вещества	мг/л	0,5	-	-
Фенольный индекс	мг/л	0,25	-	-
Щелочность	мг НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup> /л	-	-	-
Азот аммонийный	мг/л	2	с.-т.	3
Барий (Ba <sup>2+</sup> )	мг/л	0,1	с.-т.	2
Бериллий (Be <sup>2+</sup> )	мг/л	0,0002	с.-т.	1
Бор (В, суммарно)	мг/л	0,5	с.-т.	2
Ванадий (V)	мг/л	0,1	с.-т.	3
Висмут (Bi)	мг/л	0,1	с.-т.	2
Железо (Fe, суммарно)	мг/л	0,3 (1,0)	орг.	3
Кадмий (Cd, суммарно)	мг/л	0,001	с.-т.	2
Калий (K <sup>+</sup> )	мг/л	-	-	-
Кальций (Ca <sup>2+</sup> )	мг/л	-	-	-
Кобальт (Co)	мг/л	0,1	с.-т.	2
Кремний (Si)	мг/л	10	с.-т.	2
Магний (Mg <sup>2+</sup> )	мг/л	-	с.-т.	-
Марганец (Mn, суммарно)	мг/л	0,1 (0,5)	орг.	3
Медь (Cu, суммарно)	мг/л	1	орг.	3
Молибден (Mo, суммарно)	мг/л	0,25	с.-т.	2
Мышьяк (As, суммарно)	мг/л	0,05	с.-т.	2
Никель (Ni, суммарно)	мг/л	0,1	с.-т.	3
Нитраты (по NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	мг/л	45	с.-т.	3
Нитриты (по NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	мг/л	3	-	2
Ртуть (Hg, суммарно)	мг/л	0,0005	с.-т.	1
Свинец (Pb, суммарно)	мг/л	0,03	с.-т.	2
Селен (Se, суммарно)	мг/л	0,01	с.-т.	2
Серебро (Ag <sup>+</sup> )	мг/л	0,05	-	2
Сероводород (H <sub>2</sub> S)	мг/л	0,03	орг.	4
Стронций (Sr <sup>2+</sup> )	мг/л	7	орг.	2
Сульфаты (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	мг/л	500	орг.	4
Фториды (F) для климатических районов I и II	мг/л	1,51,2	с.-т.с.- т.	22
Хлориды (Cl <sup>-</sup> )	мг/л	350	орг.	4
Хром (Cr <sup>3+</sup> )	мг/л	0,5	с.-т.	3
Хром (Cr <sup>6+</sup> )	мг/л	0,05	с.-т.	3
Цианиды (CN <sup>-</sup> )	мг/л	0,035	с.-т.	2
Цинк (Zn <sup>2+</sup> )	мг/л	5	орг.	3

Для микробиологических и паразитологических показателей, а так же для органолептических свойств воды так же были составлены таблицы (таблица 3.3 и таблица 3.4).

Таблица 3.3 – Требования по микробиологическим и паразитологическим показателям воды

Показатели	Единицы измерения	Нормативы
Термотолерантные колиформные бактерии	Число бактерий в 100 мл	Отсутствие
Общие колиформные бактерии	Число бактерий в 100 мл	Отсутствие
Общее микробное число	Число образующих колонии бактерий в 1 мл	Не более 50
Колифаги	Число бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 мл	Отсутствие
Споры сульфоредактирующих клостридий	Число спор в 20 мл	Отсутствие
Цисты лямблий	Число цист в 50 мл	Отсутствие

Таблица 3.4 – Требования к органолептическим свойствам воды

Показатели	Единицы измерения	Нормативы
Органолептические свойства	баллы	2
Привкус	баллы	2
Цветность	градусы	20
Мутность	ЕМФ (ед. мутности по фармазину) или мг/л (по каолину)	2,6 (3,5) / 1,5 (2,0)

Как видно из таблиц, некоторые параметры не нормируются, однако, их важность следует так же учитывать при водоподготовке. Исходя из поставленных задач главы, определим значимость входных параметров.

### **Определение значимости входных параметров**

Перед разработкой ИНС глубокого обучения с использованием данных параметров, следует выполнить препроцессирование входящих сигналов, это позволит избавиться от дополнительных расчетов и вычислительных проблем за счет выравнивания диапазонов переменных [14, 55, 141, 134]. Наилучшим вариантом



будет перевод данных в безразмерную форму вычитанием среднего и нормированием на дисперсию. Данная операция проводится в пакете *Excel Neural Package*, после чего все входящие сигналы становятся сравнимыми по порядку величины. Выходной параметр нормализуем аналогичным способом.

Следует сказать, что существуют и другие возможные способы преобразования входящих сигналов – преобразование биполярным сигмоидом, линейная нормализация [21, 23, 141].

Кроме того, следует определить значимость входящих сигналов (*input*) относительно исходящих (*output*). В программном пакете *Excel Neural Package* это можно сделать при помощи алгоритма *Boxcounting*.

Результаты определения значимости входных параметров представлены на рисунках 3.4 - 3.6.

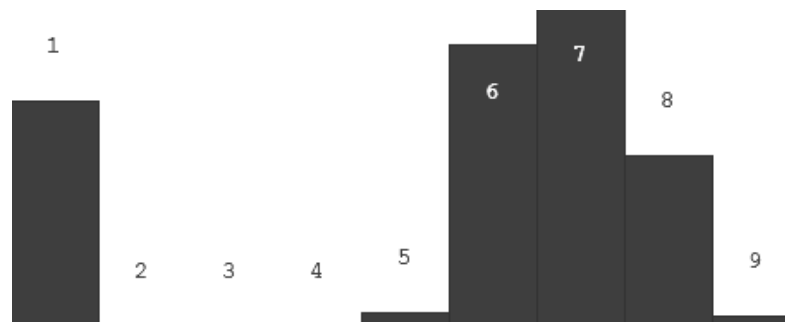


Рисунок 3.4 – Определение значимости входных параметров для дозы активированного угля

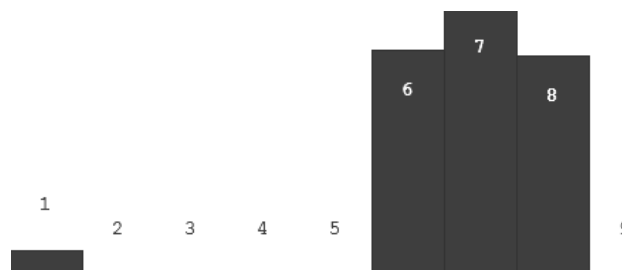


Рисунок 3.5 – Определение значимости входных параметров для адсорбционной активности

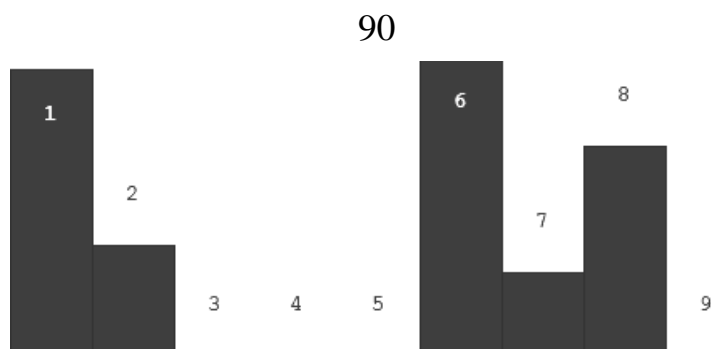


Рисунок 3.6 – Определение значимости входных параметров для времени контакта активированного угля с водой

Каждому параметру для удобства был присвоен номер:

1. Органолептические свойства прудовой воды, баллы
2. Температура воды, градусы
3. Температура окружающей среды, градусы
4. Фенольный индекс
5. Концентрация хлоридов, мг/дм<sup>3</sup>
6. Биологическое потребление кислорода, мг/дм<sup>3</sup>
7. Концентрация сине-зеленых водорослей тыс.кл/мл
8. Мутность, мг/л
9. Цветность, градусы

Как видно из графиков, значимыми параметрами являются для дозировки :

1. Органолептические свойства прудовой воды, баллы
6. Биологическое потребление кислорода, мг/дм<sup>3</sup>
7. Концентрация сине-зеленых водорослей тыс.кл/мл
8. Мутность, мг/л

Для адсорбционной активности:

1. Органолептические свойства прудовой воды , баллы
6. Биологическое потребление кислорода, мг/дм<sup>3</sup>
7. Концентрация сине-зеленых водорослей тыс.кл/мл
8. Мутность, мг/л

Для времени контакта:

1. Органолептические свойства прудовой воды, баллы

2. Температура воды, градусы
6. Биологическое потребление кислорода, мг/дм<sup>3</sup>
7. Концентрация сине-зеленых водорослей тыс.кл/мл
8. Мутность, мг/л

Менее значимыми параметрами являются для дозировки:

2. Температура воды, градусы
3. Температура окружающей среды, градусы
4. Фенольный индекс
5. Концентрация хлоридов, мг/дм<sup>3</sup>
9. Цветность, градусы

Для адсорбционной активности:

2. Температура воды, градусы
3. Температура окружающей среды, градусы
4. Фенольный индекс
5. Концентрация хлоридов, мг/дм<sup>3</sup>
9. Цветность, градусы

Для времени контакта:

3. Температура окружающей среды, градусы
4. Фенольный индекс
5. Концентрация хлоридов, мг/дм<sup>3</sup>
9. Цветность, градусы

Они несущественно влияют на результирующую переменную. Значения параметров нормализации представлено в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Значения параметров нормализации при первичном определении значимости входов

Значения параметров нормализации	Дозировка угля	Адсорбционная активность	Время контакта
Среднее значение параметра нормализации	0,289	0,404	0,382
Дисперсия	0,113	0,113	0,113
Отношение Среднее/Дисперсия	2,56	3,57	3,38

Чем больше отношение среднее значение параметра нормализации и дисперсии отличается от 1, тем лучше предсказательная сила соответствующей модели [141].

Предсказательная сила данной ИНС уже высока, но следует избавиться от параметров, которые менее значимы. Уменьшение количества входных сигналов позволяет сократить время обучения нейросети или дает возможность увеличить ее нелинейные свойства [55, 144]. Поэтому удалим наименее значимые входы. Процесс определения значимости входных сигналов можно проводить несколько раз. Так, выполним ее еще один раз (рисунок 3.7-3.9).

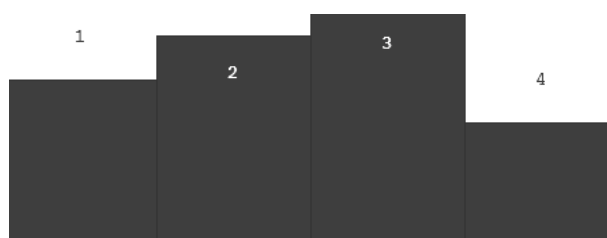


Рисунок 3.7 – Вторичное определение значимости входных параметров для дозы активированного угля



Рисунок 3.8 – Вторичное определение значимости входных параметров для адсорбционной активности активированного угля

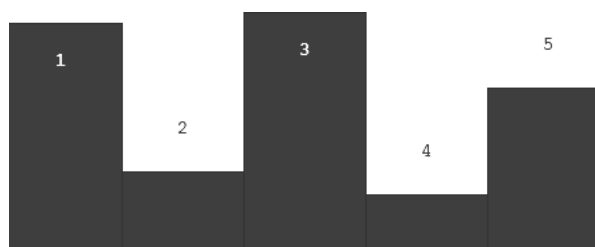


Рисунок 3.9 – Вторичное определение значимости входных параметров для времени контакта активированного угля с водой

Для дозировки, адсорбционной активности и времени контакта с водой активированного угля:

- 1 – органолептические свойства прудовой воды, баллы;
- 2 – температура воды, градусы  $^{\circ}\text{C}$ ;
- 3 – биологическое потребление кислорода,  $\text{мг}/\text{дм}^3$ ;
- 4 – концентрация сине-зеленых водорослей тыс. кл/мл;
- 5 – мутность, мг/л.

Значения параметров нормализации представлено в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Значения параметров нормализации при первичном определении значимости входов

Значения параметров нормализации	Дозировка угля	Адсорбционная активность	Время контакта
Среднее значение параметра нормализации	0,320	0,548	0,831
Дисперсия	0,113	0,113	0,113
Отношение Среднее/Дисперсия	2,83	4,84	7,35

После определения наиболее значимых параметров следует перейти к разработке структуры нейронной сети.

### **Структура нейронной сети глубокого обучения**

Создадим двухслойную нейросеть (с одним скрытым слоем) и архитектурой «4-3-1» для параметра дозирования угля и его адсорбционной активности, «5-3-1» для параметра времени контакта, при этом:

- число слоев без входного – 2;
- число входов – 4 для параметров дозирования активированного угля и адсорбционной активности, 5 – для времени контакта адсорбента с водой;
- число нейронов в 1-м слое – 3;
- порядок нелинейности первого слоя – 1;
- число нейронов во втором слое – 1;
- порядок нелинейности второго слоя – 1.

Для обоснования определения числа нейронов и количества скрытых слоев можно воспользоваться формулой (29) для оценки числа синаптических весов  $L_w$  [90, 91]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left( \frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \quad (29)$$

где  $n$  – размерность входного сигнала  $m$  – размерность выходного сигнала  $N$  – количество элементов обучающей выборки.

Исходя из этого, для разработанной нейронной сети [90, 91]:

$$L = \frac{L_w}{n + m}. \quad (30)$$

На практике редко используется архитектура нейросети с количеством скрытых слоев более одного [63, 147]. Нелинейность нейросети определяется количеством нейронов в этом скрытом слое. Структура нейросети представлена на рисунках 3.10 и 3.11.

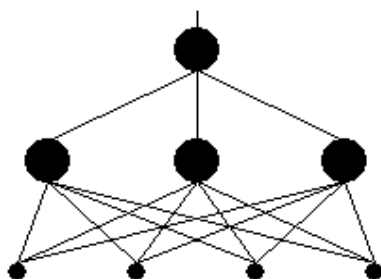


Рисунок 3.10 – Структура нейронной сети для параметров дозы и адсорбционной активности активированного угля

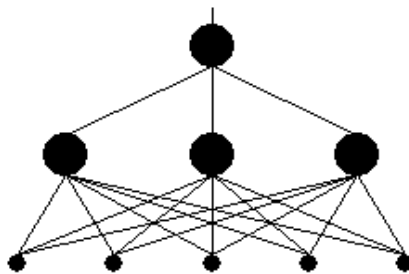


Рисунок 3.11 – Структура нейронной сети для параметра времени контакта активированного угля с водой

Учитывая показатели исходной воды, составим более подробную схему описывающую работу нейронной сети. Для показателей дозы и адсорбционной активности активированного угля входящие параметры одинаковы (различается лишь их значимость), исходя из этого составлена схема по которой проходит обучение нейронной сети (рисунки 3.12, 3.13).

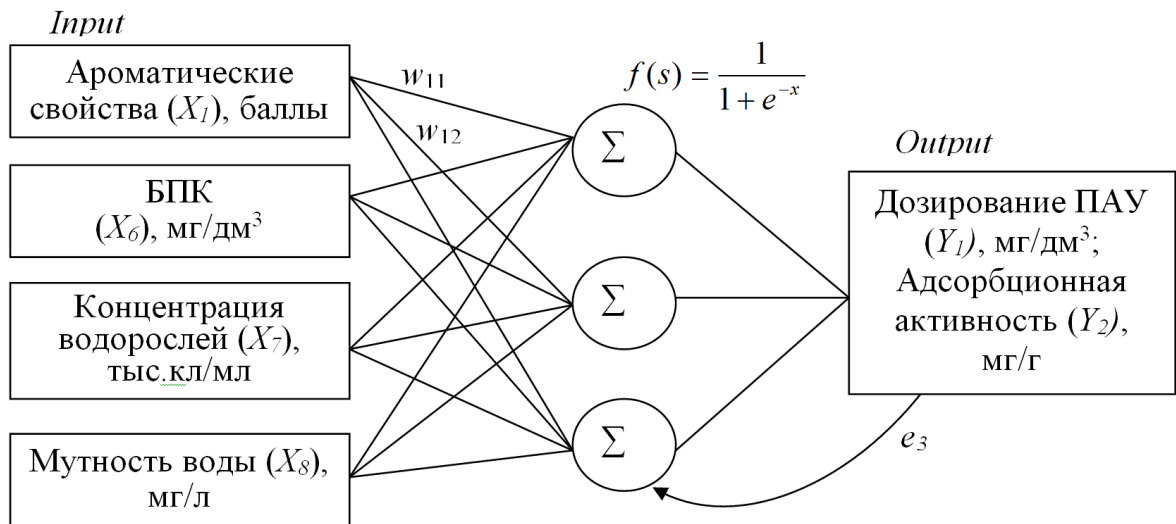


Рисунок 3.12 – Структура нейронной сети с учетом входных параметров для показателей дозы и адсорбционной активности активированного угля

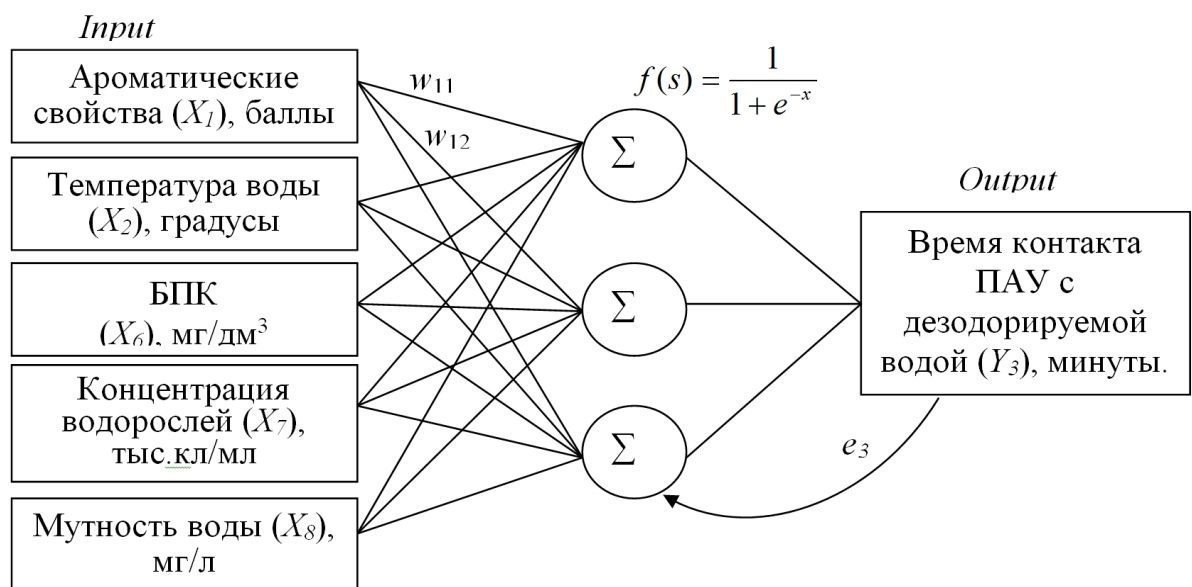


Рисунок 3.13 Структура нейронной сети с учетом входных параметров для показателя времени контакта активированного угля с питьевой водой.

При разработке и создании ИНС следует учесть, что общее число нейронных связей сети (весов) должно быть в несколько раз меньше выборки на которой проводится обучение. Данное правило обеспечит достаточно гладкую аппроксимацию данных. В обратном случае может произойти «переобучение», т.е. ИНС запомнит данные и при этом потеряет способность делать статистически важные предсказания на новых данных [141].

В нашем случае для моделирования дозировки активированного угля и адсорбционной активности имеется 15 связей, а объем выборки равен 62. Таким образом, необходимое условие успешного обучения формально выполняется (62 больше, чем 15, в 4 с лишним раза).

Для модели времени контакта имеется 18 связей, а объем выборки равен 62. Таким образом, необходимое условие успешного обучения формально выполняется (62 больше, чем 18, в 3 с лишним раза).

Для получения заведомо более качественного результата имеется 2 варианта - увеличение числа примеров до 150 (и более) или уменьшение числа связей до 3-5. Первый путь реализуется легко введением достаточного числа дополнительных обучающих примеров. Второй вариант интереснее, и он может быть реализован разными способами. Например, сокращением числа входов до двух и уменьшением числа нейронов в промежуточном слое до двух. Тогда получится сеть типа «2-2-1» с пятью связями [55, 93].

### **Обучение нейронной сети**

Перед проведением обучения ИНС следует задать тестовую выборку. В нашем случае тестовая выборка составляет 20 % от общей генеральной совокупности [141, 55]. Данные из этой выборки не участвуют в обучении. На них будет проверена адекватность и достоверность полученных результатов обученной ИНС. Кроме того, следует оставить некоторую часть выборки для проверки работоспособности будущей модели. В качестве примеров тестовой выборки были взяты данные по показателям исходной воды и процессу дезодорации с 2013 по 2014 годы [138]. Проверка разработанной модели и полученных результатов бу-



дет осуществлена в главе 4. Процесс обучения нейронной сети приведен на рисунке 3.14, проводился в программном пакете надстроек *Excel Neural Package*.

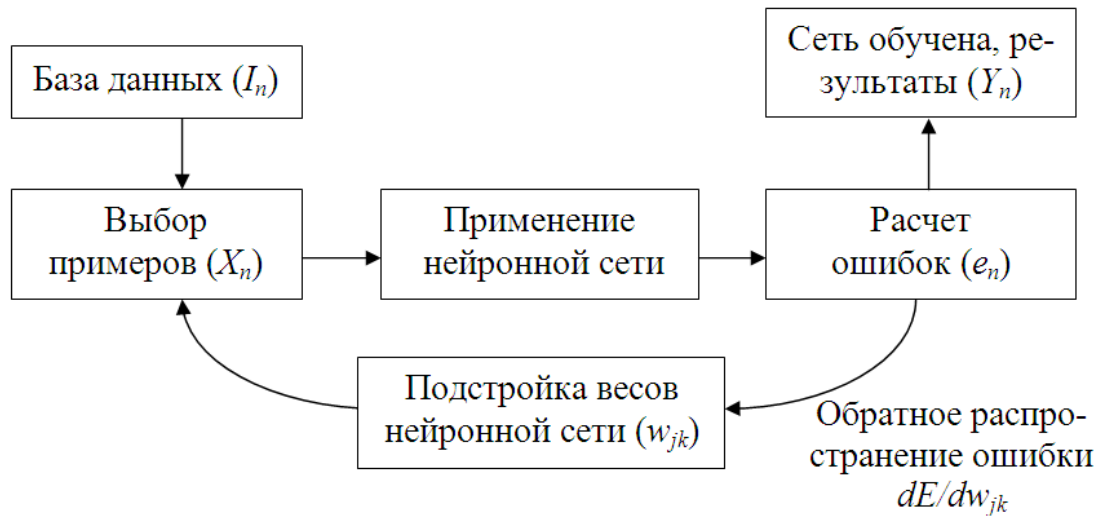


Рисунок 3.14 – Графическая схема процесса обучения нейронной сети

Изначально погрешность нейронной сети для дозировки активированного угля 0,9. После проведения обучения нейронной сети через 7277 эпох погрешность нейронной сети (*training error*) сократилась до 0,49. Для адсорбционной активности – начальная погрешность составляла 1,48. После проведения обучения, через 6132 эпох погрешность нейронной сети 0,53. Для времени контакта начальная погрешность составляла 1,08. После проведения обучения, через 6157 эпох погрешность нейронной сети 0,21. Результаты обучения нейронных сетей для параметров дозирования активированного угля, его адсорбционной активности и времени контакта с очищаемой водой представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты обучения нейронной сети

№	Фактическое			Результат обучения		
	Дозы угля	Адс. акт.	Время контак- та	Дозы угля	Адс. акт.	Время кон- такта
1	3,50	190,00	2,1	3,16	185,25	2,16
2	3,70	202,35	2,75	3,16	181,26	2,73
3	4,10	202,35	3,05	3,16	191,92	3,01
4	4,20	210,00	3,55	3,16	191,92	3,54
5	5,20	202,35	3,75	3,16	193,16	3,79
6	4,10	202,35	2,8	3,16	189,53	2,75
7	3,31	170,00	2,35	3,16	175,36	2,34
8	3,17	180,00	2,63	3,16	185,10	2,60
9	6,50	180,00	3,13	3,16	189,99	3,10
10	6,92	190,00	3,14	3,16	188,86	3,13
11	4,49	180,00	3,45	3,16	193,73	3,45
12	3,00	160,00	2,06	3,16	179,48	2,13
13	1,00	170,00	2,15	3,16	173,91	2,22
14	1,00	170,00	3,05	3,16	188,14	3,01
15	2,50	180,00	3,8	3,16	193,56	3,82
16	4,00	170,00	2,95	3,16	179,02	2,94
17	3,00	160,00	2,00	1,31	168,84	1,85
18	2,00	170,00	2,55	3,16	180,11	2,54
19	3,00	170,00	2,75	3,16	185,78	2,75
20	2,00	170,00	2,95	3,16	191,03	2,95
21	2,00	180,00	3,05	3,16	200,63	3,11
22	1,00	190,00	2,75	0,74	197,61	2,76
23	0,80	180,00	2,00	1,31	181,96	1,85
24	0,80	197,70	3,00	0,89	195,95	3,00
25	5,60	197,70	2,75	3,16	197,57	2,74
26	6,50	197,70	2,8	3,16	197,87	2,79
27	7,60	210,00	3,45	8,55	212,72	3,45
28	5,40	197,70	3,3	5,96	207,85	3,27
29	0,80	190,00	2,00	2,15	170,58	1,88
30	4,60	201,35	2,15	3,16	179,22	2,14
31	4,70	201,35	2,55	6,62	201,02	2,54
32	5,00	201,35	2,8	8,37	202,96	2,82
33	7,00	210,00	3,45	8,55	218,42	3,46
34	5,00	212,00	2,50	5,96	207,12	2,45
35	2,10	170,00	2,00	2,72	170,38	1,62
36	2,59	179,90	2,14	3,16	179,99	2,19
37	2,12	179,90	2,00	0,69	171,35	1,98
38	8,35	179,90	2,365	7,17	179,82	2,40
39	10,30	179,90	2,00	8,44	185,03	2,00
40	10,70	190,00	2,395	8,55	191,44	2,42
41	10,40	179,90	2,69	7,55	200,90	2,70
42	0,80	170,00	2,00	3,15	180,07	2,05
43	1,00	180,00	2,45	3,16	176,32	2,45
44	2,20	217,30	2,75	3,16	200,20	2,74
45	2,20	217,30	2,95	3,75	202,04	2,91

Продолжение таблицы 3.7

№	Фактическое			Результат обучения		
	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта
46	8,30	217,30	3,75	8,57	220,94	3,74
47	12,00	225,00	8,00	11,05	224,73	8,00
48	5,00	225,00	3,5	6,11	207,94	3,51
49	0,80	180,00	2,00	0,92	175,20	1,85
50	0,80	210,00	2,355	3,16	191,13	2,35
51	0,80	210,00	2,945	3,16	205,62	2,91
52	0,90	210,00	5,09	8,25	207,38	5,05
53	16,40	210,00	4,035	13,63	212,90	4,10
54	7,04	225,00	3,805	7,04	225,33	3,75
55	6,00	225,00	3,55	8,55	220,17	3,55
56	0,80	180,00	1,53	1,26	174,97	1,87
57	4,13	190,00	1,16	3,49	184,60	1,72
58	6,00	202,00	2,34	3,05	199,32	2,34
59	15,00	210,00	4,21	13,55	206,98	4,25
60	12,70	225,00	4,13	13,63	223,63	4,18
61	14,70	225,00	5,50	13,63	224,53	5,49
62	10,30	225,00	5,05	8,25	214,49	5,06

Как видно из графиков и таблицы для параметра дозирования угля, нейронная сеть реагировала не сразу, в то время как для адсорбционной активности процесс обучения начался почти сразу. После определения значимости входных параметров и их препроцессирования, составления структуры и обучения нейронной сети можно провести моделирование значения выходного параметра.

### 3.3 Результаты нейрорегрессии и достоверность результатов

Для более глубокой оценки полученных результатов обученной ИНС (Приложение В) проведем регрессионный анализ данных. Полученные уравнения регрессии и являются эффективным инструментом для анализа полученных результатов, однако разработку модели в дальнейшем следует проводить исходя из результатов обученной ИНС ввиду ее более точных результатов. Уравнение регрессии для моделирования данных дозирования активированного угля будет иметь следующий вид:

$$Y_1 = -0,41 + 1,52X_1 + 0,44X_6 + 0,006X_7 - 0,17X_8. \quad (31)$$

Для адсорбционной активности:

$$Y_2 = 160 + 2,94X_1 + 3,79X_6 + 0,022X_7 + 1,87X_8. \quad (32)$$

Для времени контакта:

$$Y_3 = 0,49 + 0,414X_1 + 0,003X_2 + 0,415X_6 + 0,0009X_7 - 0,031X_8. \quad (33)$$

В уравнениях (31) – (33):

$Y_1$  – доза угля, мг/дм<sup>3</sup>;

$Y_2$  – адсорбционная активность, мг/г;

$Y_3$  – время контакта, минуты;

$X_1$  – органолептические свойства прудовой воды, баллы;

$X_2$  – температура воды, °C;

$X_6$  – биологическое потребление кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;

$X_7$  – концентрация сине-зеленых водорослей тыс.кл/мл;

$X_8$  – мутность, мг/л.

Результаты статистики для полученных результатов представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Статистика для модельных данных основных параметров дезодорации питьевой воды

Статистика	Параметр адсорбента		
	Дозировка	Адсорбционная активность	Время контакта
Нейростатистический показатель			
Число обучающих примеров	62	62	62
Число независимых переменных	4	4	5
Общая нейроошибка	691,014	14605,021	67,945
Ошибка регрессии	428,214	12423,417	53,954
Остаток	262,800	2181,605	13,991
Коэф. детерминации,	0,787	0,851	0,794
Коэффициент множественной корреляции	0,620	0,922	0,891
Стандартная ошибка	2,147	6,187	0,499
Критерий Фишера	23,219	81,148	43,191
Значимость критерия Фишера	$2,02 \cdot 10^{-11}$	$7,39 \cdot 10^{-23}$	$5,18 \cdot 10^{-18}$

Для доказательства адекватности модели следует сравнить критерий Фишера с табличным значением [55, 141]. Табличное значение критерия Фишера при

доверительной вероятности для дозирования активированного угля 0,95,  $\nu_1 = k = 4$ ,  $\nu_2 = n - k - 1 = 57$  составляет 2,53. Поскольку  $F_{\text{расч}} = 23,219 > F_{\text{табл}} = 2,53$ , то уравнение регрессии можно считать адекватным. Для адсорбционной активности  $\nu_1 = k = 4$ ,  $\nu_2 = n - k - 1 = 57$  составляет 2,53. Так как  $F_{\text{расч}} = 81,148 > F_{\text{табл}} = 2,53$ , то уравнение регрессии для адсорбционной активности так же можно считать адекватным. Для времени контакта  $\nu_1 = k = 5$ ,  $\nu_2 = n - k - 1 = 56$  составляет 2,54. Поскольку  $F_{\text{расч}} = 43,191 > F_{\text{табл}} = 2,54$ , то уравнение регрессии для адсорбционной активности так же можно считать адекватным.

Расчет уравнения нейрорегрессии. Теперь на основе полученных результатов составим уравнение нейрорегрессии. В таблице показан расчет коэффициентов уравнения регрессии для моделирования значений нейронной сети и сопутствующая статистика Стьюдента ( $t$ -критерий):

Таблица 3.9 – Расчет коэффициентов уравнения регрессии полученных на основе обученной нейронной сети для основных параметров дезодорации питьевой воды

Параметр	Коэффициент нейрорегрессии	Стандартная ошибка	Критерий Стьюдента
Доза активированного угля	-0,414	1,082	-0,383
Органолептические свойства	1,527	0,437	3,490
БПК полное	0,445	0,243	1,828
Концентрация сине-зеленых	0,006	0,001	4,212
Мутность	-0,169	0,237	-0,716
Адсорбционная активность	160,09	3,12	51,37
Органолептические свойства	2,94	1,26	2,33
БПК полное	3,80	0,70	5,42
Концентрация сине-зеленых	0,02	0,0001	5,93
Мутность	1,87	0,68	2,75
Время контакта	0,49	0,26	1,92
Органолептические свойства	0,41	0,11	3,71
Температура воды	0,00	0,01	0,28
БПК полное	0,42	0,06	7,33
Концентрация сине-зеленых	0,00	0,0003	2,83
Мутность	-0,03	0,06	-0,56

Уравнение нейрорегрессии для моделирования дозы активированного угля. Табличное значение критерия Стьюдента [55, 141] при уровне значимости 5% и

степенях свободы  $62-4-1 = 57$  составляет 2,00. Так как расчетное значение больше табличного для органолептических свойств исходной воды и концентрации сине-зеленых водорослей, то только они могут рассматриваться как значимые. Остальные коэффициенты можно опустить. С учетом проведенного анализа результаты нейромоделирования могут быть записаны в виде приближенного уравнения нейрорегрессии:

$$Y_1 = 1,5X_1 + 0,006X_7. \quad (34)$$

Уравнение нейрорегрессии для моделирования адсорбционной активности. Табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости 5% и степенях свободы  $62-4-1 = 57$  так же составляет 2,00.

Расчетное значение критерия Стьюдента больше табличного для всех параметров, поэтому уравнение нейрорегрессии будет аналогичным уравнению, полученному в результате регрессионного анализа:

$$Y_2 = 160 + 2,94X_1 + 3,79X_6 + 0,022X_7 + 1,87X_8 \quad (35)$$

Уравнение нейрорегрессии для моделирования времени контакта порошкообразного активированного угля с водой. Табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости 5% и степенях свободы  $62-5-1 = 56$  так же составляет 2,00.

Расчетное значение критерия Стьюдента больше табличного для органолептических свойств исходной воды, биологического потребления кислорода, концентрации сине-зеленых водорослей:

$$Y_3 = 0,414X_1 + 0,415X_6 + 0,0009X_7, \quad (36)$$

где

$Y_1$  – дозы угля, мг/дм<sup>3</sup>;

$Y_2$  – адсорбционная активность, мг/г;

$Y_3$  – время контакта, минуты

$X_1$  – органолептические свойства исходной воды, баллы;

$X_6$  – биологическое потребление кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;

$X_7$  – концентрация сине-зеленых водорослей, тыс.кл/мл;

$X_8$  – мутность, мг/л.

Общая оценка работы нейросети и уравнения нейрорегрессии приведена в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты полученные при помощи нейронной сети и регрессионного анализа

№	Фактические			Нейронная сеть			Нейрорегрессия		
	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта
1	3,50	190	2,1	2,29	177,77	2,21	1,51	177,77	1,74
2	3,70	202,35	2,75	3,60	185,75	2,72	3,03	185,75	2,28
3	4,10	202,35	3,05	4,07	190,56	3,01	3,35	190,56	2,58
4	4,20	210,00	3,55	5,64	192,91	3,43	4,85	192,91	3,00
5	5,20	202,35	3,75	5,85	194,31	3,59	4,87	194,31	3,16
6	4,10	202,35	2,8	3,81	184,25	2,76	3,03	184,25	2,33
7	3,31	170,00	2,35	2,27	182,47	2,39	1,52	182,47	1,95
8	3,17	180,00	2,63	2,63	187,06	2,66	1,78	187,06	2,22
9	6,50	180,00	3,13	4,03	191,52	3,06	3,29	191,52	2,64
10	6,92	190,00	3,145	4,32	193,45	3,10	3,62	193,45	2,70
11	4,49	180,00	3,45	5,44	189,53	3,31	4,59	189,53	2,87
12	3,00	160,00	2,06	2,31	179,38	2,20	1,68	179,38	1,74
13	1,00	170,00	2,15	2,27	181,62	2,27	1,70	181,62	1,81
14	1,00	170,00	3,05	4,23	188,66	3,04	3,34	188,66	2,58
15	2,50	180,00	3,8	6,31	196,52	3,70	5,29	196,52	3,27
16	4,00	170,00	2,95	4,74	189,18	2,85	4,63	189,18	2,46
17	3,00	160,00	2,00	1,53	176,07	1,69	1,52	176,07	1,26
18	2,00	170,00	2,55	3,74	185,43	2,61	3,34	185,43	2,17
19	3,00	170,00	2,75	4,15	187,09	2,81	3,52	187,09	2,36
20	2,00	170,00	2,95	4,33	195,43	2,96	3,99	195,43	2,59
21	2,00	180,00	3,05	4,81	197,94	3,09	4,39	197,94	2,74
22	1,00	190,00	2,75	4,12	199,34	2,90	3,57	199,34	2,59
23	0,80	180,00	2,00	1,03	180,49	1,54	1,52	180,49	1,21
24	0,80	197,70	3,00	1,23	183,94	1,67	1,79	183,94	1,33
25	5,60	197,70	2,75	4,35	196,16	2,82	4,28	196,16	2,47
26	6,50	197,70	2,8	4,56	197,20	2,89	4,45	197,20	2,54
27	7,60	210,00	3,45	8,77	212,06	3,79	8,58	212,06	3,47
28	5,40	197,70	3,3	8,83	217,19	3,83	8,38	217,19	3,54
29	0,80	190,00	2,00	1,64	176,10	1,76	1,52	176,10	1,32
30	4,60	201,35	2,15	3,55	182,00	2,29	3,43	182,00	1,85
31	4,70	201,35	2,55	4,81	194,33	2,76	4,74	194,33	2,37
32	5,00	201,35	2,8	5,22	197,22	2,99	4,94	197,22	2,61

Продолжение таблицы 3.10

№	Фактические			Нейронная сеть			Нейрорегрессия		
	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта	Дозы угля	Адс. акт.	Время контакта
33	7,00	210,00	3,45	8,31	207,76	3,72	7,94	207,76	3,38
34	5,00	212,00	2,50	8,08	208,18	3,17	8,15	208,18	2,85
35	2,10	170,00	2,00	1,08	167,61	1,07	1,50	167,61	0,62
36	2,59	179,90	2,14	2,26	179,55	2,24	1,57	179,55	1,79
37	2,12	179,90	2,00	2,24	179,81	1,99	2,03	179,81	1,53
38	8,35	179,90	2,365	4,26	186,89	2,56	4,04	186,89	2,12
39	10,30	179,90	2,00	3,77	187,01	2,01	4,45	187,01	1,63
40	10,70	190,00	2,395	6,10	194,35	2,67	6,64	194,35	2,31
41	10,40	179,90	2,69	5,07	196,68	2,84	4,92	196,68	2,52
42	0,80	170,00	2,00	2,05	176,68	2,01	1,51	176,68	1,57
43	1,00	180,00	2,45	3,61	185,25	2,49	3,35	185,25	2,08
44	2,20	217,30	2,75	4,82	196,23	2,89	4,64	196,23	2,53
45	2,20	217,30	2,95	5,40	199,52	3,13	5,05	199,52	2,75
46	8,30	217,30	3,75	9,84	216,40	4,19	9,31	216,40	3,83
47	12,00	225,00	8,00	13,03	232,53	4,99	12,19	232,53	4,68
48	5,00	225,00	3,5	8,23	215,49	3,88	7,59	215,49	3,59
49	0,80	180,00	2,00	1,69	173,64	1,67	1,51	173,64	1,23
50	0,80	210,00	2,355	3,53	189,62	2,40	3,70	189,62	2,06
51	0,80	210,00	2,945	5,80	195,77	3,01	5,87	195,77	2,65
52	0,90	210,00	5,09	8,75	208,31	4,80	7,16	208,31	4,39
53	16,40	210,00	4,035	10,23	223,40	4,43	9,74	223,40	4,13
54	7,04	225,00	3,805	10,65	220,26	4,49	9,35	220,26	4,11
55	6,00	225,00	3,55	6,62	203,46	3,69	5,52	203,46	3,32
56	0,80	180,00	1,53	1,72	174,24	1,71	1,52	174,24	1,27
57	4,13	190,00	1,16	2,14	180,48	1,53	2,67	180,48	1,14
58	6,00	202,00	2,34	3,03	187,63	2,52	2,44	187,63	2,09
59	15,00	210,00	4,21	7,46	202,44	4,17	6,07	202,44	3,73
60	12,70	225,00	4,13	9,00	212,79	4,33	8,01	212,79	3,95
61	14,70	225,00	5,50	9,92	225,63	5,39	7,96	225,63	5,08
62	10,30	225,00	5,05	6,95	216,87	4,77	4,93	216,87	4,48

Как видно из таблицы, результаты нейромоделирования хорошо аппроксимируют фактические данные и общая квадратичная ошибка [141, 55] составляет для дозирования активированного угля 0,016% ( для нейрорегрессии 0,018%), для адсорбционной активности 0,286% (для нейрорегрессии аналогичное значение), для времени контакта адсорбента с водой 0,001% (для нейрорегрессии 0,002%). Графики дозирования активированного угля, адсорбционной активности и времени контакта с водой представлены на рисунках 3.15 - 3.19. соответственно (экспери-



ментальные значения, значения полученные на основе нейронной сети, значения рассчитанные по уравнению нейрорегрессии)

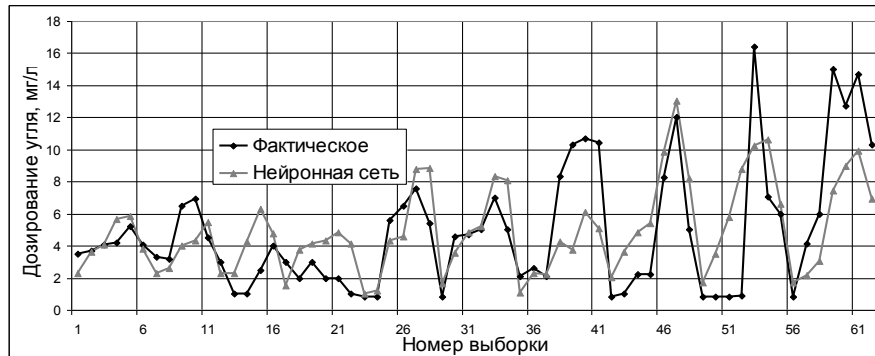


Рисунок 3.15 – Сравнение результатов моделирования нейронной сети и фактических значений для параметра дозы активированного угля

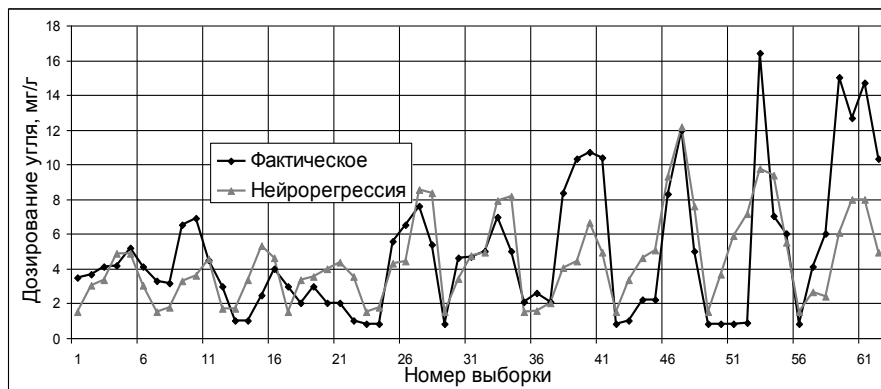


Рисунок 3.16 – Сравнение результатов нейрорегрессии и фактических значений для параметра дозы активированного угля

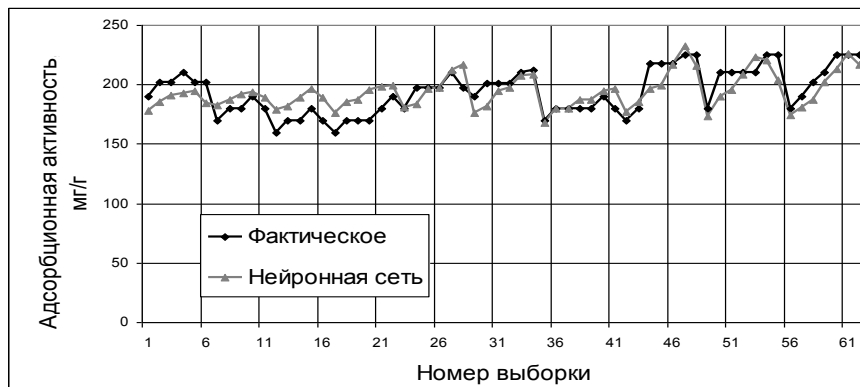


Рисунок 3.17 – Сравнение результатов нейрорегрессионного моделирования и фактических значений для адсорбционной активности активированного угля

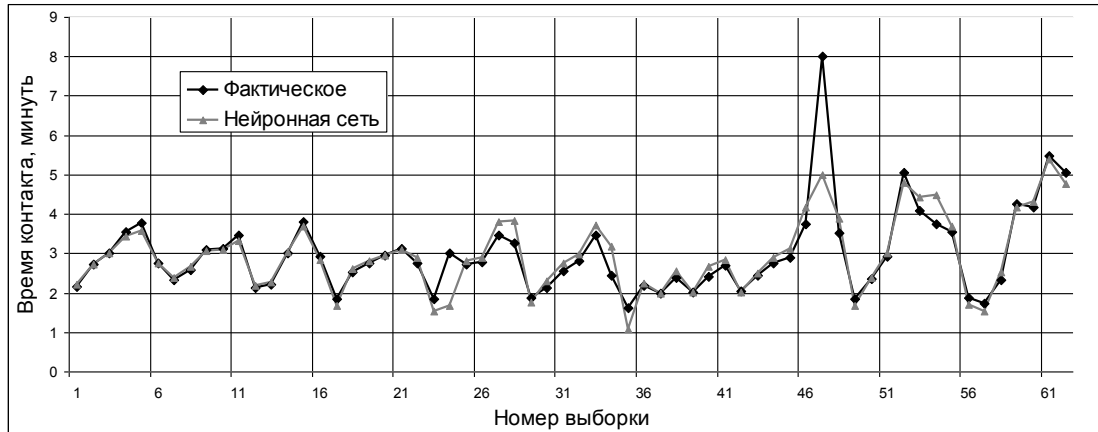


Рисунок 3.18 – Сравнение результатов моделирования при помощи нейронной сети и фактических значений для параметра времени контакта порошкообразного активированного угля с водой

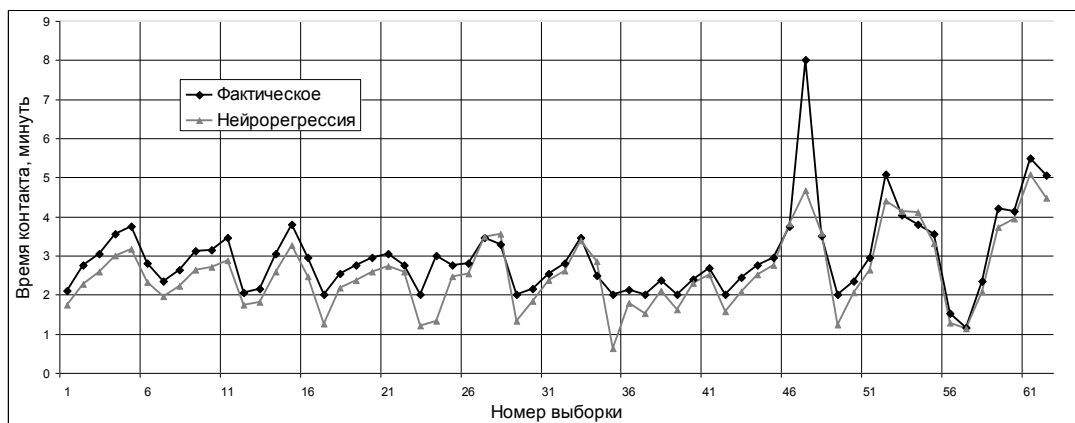


Рисунок 3.19 – Сравнение результатов полученных при помощи уравнения нейрорегрессии и фактических значений для параметра времени контакта порошкообразного активированного угля с водой

Применение разработанной модели в качестве инструмента прогнозирования параметров сорбции поможет рассчитать оптимальные параметры процесса дезодорации, а также сократить остаток сорбента после сезонной очистки.

На рассматриваемом предприятии с 2003 по 2012 год ежегодная среднесезонная сумма остатка активированного угля составляет 10,282 тонн, в то время как сумма остатка модельных значений (в данном случае средняя ошибка регрессии) составляет всего лишь 15 килограмм (см. таблицу 3.11).

Таблица 3.11 – Экономическая эффективность от применения разработанной модели на предприятии с 2003 по 2012 год

Остаток сорбента после сезонной очистки на предприятии, тонны	Остаток сорбента после сезонной очистки для данного предприятия полученный в результате моделирования, тонны	Разница между остатком после сезонной очистки на предприятии и полученным путем моделирования, тонны	Экономия средств на закупку сорбента, рубли*
1,02	0,016	1,004	80320
21,035	0,012	21,023	1681840
13,6	0,013	13,587	1086960
11,3	0,013	11,287	902960
7,8	0,01	7,79	623200
3	0,014	2,986	238880
2,9	0,014	2,886	230880
9	0,019	8,981	718480
0,5	0,02	0,48	38400
14,8	0,019	14,781	1182480

\*при средней закупочной цене 80 рублей/килограмм

Разработанная модель для основных параметров дезодорации позволит сократить ежегодный остаток сорбента после сезонной очистки воды от одорирующих веществ на 99,83 %. При средней закупочной цене активированного угля марок ОУ-А и ОУ-Б в 80 рублей за килограмм, с 2003 по 2012 год возможно было сократить расходы на каждую сезонную закупку сорбента в количестве до 1,5 миллионов рублей (без учета резервного запаса сорбента).

### Выводы по главе

1. Доказана возможность применения искусственной нейронной сети, корреляционного и регрессионного анализа данных для моделирования основных параметров процесса дезодорации питьевой воды.

2. На основе нейронной сети и регрессионного анализа данных была разработана модель для таких параметров как дозирование активированного угля, его адсорбционная активность, время контакта с водой в зависимости от показателей исходной воды (31, 32, 33). Кроме того, на основе результатов обученной нейронной сети были разработаны уравнения нейрорегрессии (34, 35, 36).

3. При помощи коэффициента Фишера было доказано, что полученная модель дезодорации воды адекватно рассчитывает данные показатели (для дозы активированного угля – 23,22 , адсорбционной активности – 81,15, времени контакта с питьевой водой – 43,191). При этом результаты нейромоделирования хорошо аппроксимируют фактические данные.

4. Актуальным представляется применение разработанных уравнений в качестве инструмента прогнозирования параметров адсорбции, это поможет оптимизировать процесс дезодорации питьевой воды (рассчитать оптимальные значения дозы, адсорбционной активности, времени контакта), а также сократить остаток адсорбента после сезонной очистки. Было рассчитано, что при помощи разработанной модели в период с 2002 по 2012 можно было сократить остаток сорбента после сезонной очистки на 99,83 % а также сэкономить денежные средства в размере 1,5 миллионов рублей. Проверка работоспособности разработанной модели и возможность ее применения в качестве инструмента по оптимизации процесса дезодорации питьевой воды на основе полученных уравнений и результатов будет рассмотрена на примерах за 2013-2014 год в следующей главе.

## **ГЛАВА 4. ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В КАЧЕСТВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ДЛЯ ПРОЦЕССА ДЕЗОДОРАЦИИ ВОДЫ**

### **4.1. Проверка полученных результатов для основных значений параметров дезодорации в системе питьевого водоснабжения**

Полученная модель на основе обученной нейронной сети для параметров адсорбента при дезодорации питьевой воды уже была проверена в предыдущей главе при помощи критерия Фишера и коэффициента Стьюдента. Тем не менее, следует оценить адекватность, достоверность и возможность применения полученных результатов для независимых значений, которые ранее не учитывались ни при обучении нейронной сети, ни при регрессионном анализе, тем самым будет проведена независимая оценка и возможность применения модели в качестве инструмента для прогноза оптимальных параметров адсорбента.

Во-первых, следует проверить адекватность и достоверность полученных уравнений нейререгрессии. Во-вторых – рассмотреть адекватность и достоверность обученной нейронной сети на независимой выборке. После чего провести сравнительный анализ значений полученных на основе уравнений нейререгрессии и обученной ИНС.

Кроме того, следует принять во внимание ряд факторов, которые не учитывались при обучении нейронной сети и регрессионном анализе данных для моделирования параметров адсорбента на основе показателей исходной воды, но которые тем не менее влияют на процессы сорбции.

Полученные результаты применимы для параметров воды с 2013 по 2014 годы когда применялась дезодорация питьевой воды и был применен адсорбент (Приложение А, Б, В) [138]. Тем самым будет проверена работоспособность и предсказательная способность разработанных ранее уравнений и полученных результатов при помощи нейронной сети и регрессионного анализа. Для проверки

работоспособности разработанной модели для основных параметров дезодорации в первую очередь была сформирована выборка по фактическим значениям МУП «Ижводоканал» с 2013 по 2014 годы.

Исходя из полученных ранее, при помощи нейронной сети и регрессионного анализа, уравнений для параметров дезодорации (14, 15, 16, 17, 18, 19), проведем моделирование, на основе показателей исходной воды, значения для дозирования активированного угля, адсорбционной активности и времени контакта за 2013 и 2014 годы. Данные значения не учитывались при обучении нейронной сети и регрессионном анализе данных. Полученные результаты представлены в таблице 4.1 и на рисунках 4.1-4.3

Таблица 4.1 – Сравнение результатов полученных при помощи нейрорегрессионного моделирования и фактических значений для основных параметров дезодорации питьевой воды с 2013 по 2014 годы

№	Доза			Адсорбционная активность			Время контакта		
	Фактическое	нейронная сеть	нейрорегрессия	Фактическое	Нейронная сеть	Нейрорегрессия	Фактическое	Нейронная сеть	Нейрорегрессия
1	0,8	0,67	1,51	180,00	178,47	178,47	2,00	1,24	0,93
2	5,50	1,24	1,93	180,00	181,61	181,61	2,00	1,47	1,14
3	9,90	4,99	4,14	212,71	198,91	198,91	3,95	3,41	3,03
4	11,00	9,55	8,06	225,00	221,39	221,39	5,25	4,98	4,65
5	16,00	12,99	12,19	225,00	235,59	235,59	6,00	5,14	4,86
6	16,00	12,21	11,66	225,00	232,81	232,81	5,65	5,14	4,91
7	16,70	6,45	5,49	212,71	204,43	204,43	4,65	3,66	3,32
8	6,00	3,76	2,80	180,00	196,95	196,95	3,65	3,06	2,73
9	0,9	1,82	1,58	182,80	178,31	178,31	2,00	1,89	1,48
10	5,60	2,99	3,70	215,93	185,86	185,86	2,90	1,93	1,59
11	3,93	7,82	7,54	225,00	201,03	201,03	3,50	3,72	3,35
12	8,28	8,50	8,37	225,00	208,48	208,48	3,50	3,64	3,30
13	14,10	9,39	9,02	225,00	214,59	214,59	6,00	4,03	3,70
14	13,70	9,20	8,85	225,00	218,82	218,82	5,00	4,18	3,90
15	6,16	5,14	4,97	215,93	201,70	201,70	3,30	3,06	2,78

На рисунках 4.1-4.3 представлены графики сравнения фактических значений и значений, полученных при решении по разработанным ранее уравнениям

(31, 32, 33, 34, 35, 36) для параметров дозы активированного угля, адсорбционной активности, а также времени контакта соответственно.

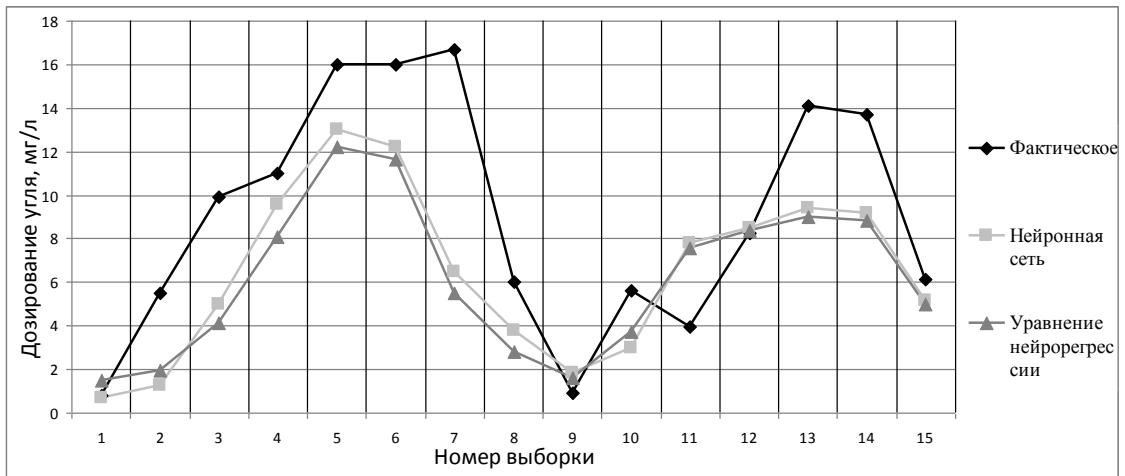


Рисунок 4.1 – Сравнение результатов полученных при помощи нейрорегрессионного моделирования и фактических значений для параметра дозы активированного угля с 2013 по 2014 годы

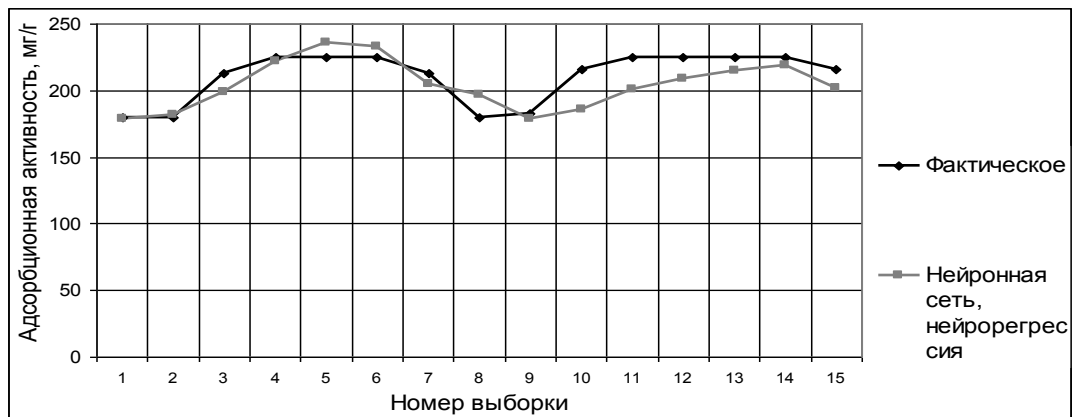


Рисунок 4.2 – Сравнение результатов полученных при помощи нейрорегрессионного моделирования и фактических значений для параметра адсорбционной активности активированного угля с 2013 по 2014 годы

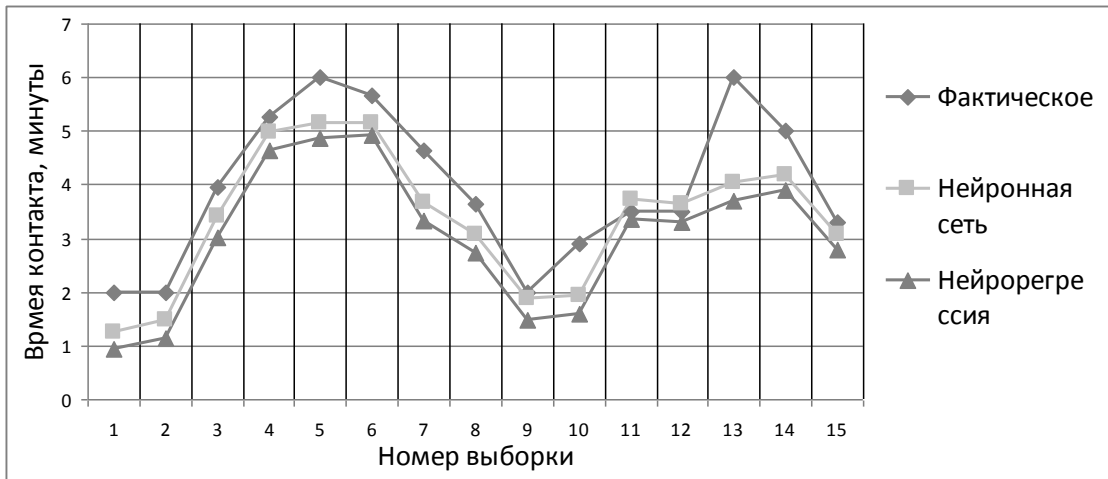


Рисунок 4.3 – Сравнение результатов полученных при помощи нейрорегрессионного моделирования и фактических значений для параметра время контакта активированного угля с водой (с 2013 по 2014 годы)

Как видно из графиков и таблицы, некоторые параметры адсорбента при проведении дезодорации можно изменить за счет других. Так например, дозирование угля можно сократить за счет повышения адсорбционной активности: другими словами сократить дозировку за счет использования марок углей более высокого качества (использование марки угля ОУ-А в место использования марки ОУ-Б).

То же самое касается и дозы активированного угля состоящей из нескольких марок. Анализируя использование марок углей на рассматриваемом предприятии с 2003 по 2014 год можно сказать, что активированный уголь марки ОУ-А стал использоваться гораздо чаще чем марки ОУ-Б.

Достоверность полученных результатов. Для подтверждения достоверности полученных результатов следует сравнить степень статистической зависимости между двумя переменными (моделью и фактическими значениями), а также их дисперсии. Для этого проведем описательную статистику, результаты которой представлены в таблице 4.2.



Таблица 4.2 – Результаты математической описательной статистики

Показатели	Параметры	Фактическое	Нейронная сеть	Нейрорегрессия
Дозировка	Среднее	9,59	6,44	6,12
	Стандартная ошибка	1,53	1,01	0,91
	Стандартное отклонение	5,93	3,89	3,55
	Дисперсия выборки	35,18	15,21	12,58
	Уровень надежности (95,0%)	3,28	2,16	1,96
Адсорбционная активность	Среднее	213,27	203,93	203,93
	Стандартная ошибка	3,11	4,738	4,738
	Стандартное отклонение	12,03	18,35	18,35
	Дисперсия выборки	144,71	336,76	336,76
	Уровень надежности (95,0%)	6,67	10,16	10,16
Время контакта	Среднее	3,96	3,37	3,04
	Стандартная ошибка	0,36	0,33	0,33
	Стандартное отклонение	1,41	1,27	1,29
	Дисперсия выборки	2,00	1,63	1,68
	Уровень надежности(95,0%)	0,78	0,71	0,71

Для сравнения дисперсий воспользуемся коэффициентом Фишера (8) [36]. В нашем случае критерий Фишера:

- для дозы активированного угля равен 2,31 – нейронная сеть и 2,79 – нейрорегрессия;
- для адсорбционной активности равен 2,33 - нейронная сеть и такой же коэффициент для нейрорегрессии;
- для времени контакта равен 1,23 – нейронная сеть и 1,19 – нейрорегрессия;

При критерии Фишера не выше 2,97 полученные результаты можно считать достоверными [36, 56] (если критерий Фишера более 2,97 - значит выборки разные), другими словами полученные результаты являются достоверными и находятся в установленных пределах.

Также для расчета степени статистической зависимости между двумя числовыми переменными следует рассчитать коэффициент корреляции [29, 36, 53]:

- для дозы активированного угля равен 0,71 - нейронная сеть и 0,69 - нейрорегрессия;
- для адсорбционной активности равен 0,75 - нейронная сеть и такой же коэффициент для нейрорегрессии;

- для времени контакта равен 0,92 - нейронная сеть и 0,93 для нейрорегрессии.

Из этого следует, что для достоверности расчетов коэффициент корреляции должен быть выше  $|0,5|$ , в нашем случае это условие выполняется [36, 53, 125]. Кроме того, следует оценить отклонения фактических и полученных значений. Определим коэффициент Стьюдента (при уровне значимости 0,05), а так же введем коэффициент  $p$ , в результате расчетов значения которого должны быть выше уровня значимости. Исходя из вышесказанного, проведем двухвыборочный  $t$ -тест с различными дисперсиями, полученные результаты представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Двухвыборочный  $t$ -тест с различными дисперсиями

Вещество	Параметры	Фактическое	Нейронная сеть	Нейрорегрессия
Доза активированного угля	Среднее	9,59	6,45	6,12
	Дисперсия	35,18	15,21	12,58
	Наблюдения	15	15	15
	$t$ -статистика	-	1,71	1,94
	$p$ ( $T \leq t$ ) двухстороннее	-	<b>0,09</b>	<b>0,064</b>
	$t$ критическое двухстороннее	-	2,06	2,06
Адсорбционная активность	Среднее	213,27	203,93	203,93
	Дисперсия	144,71	336,76	336,76
	Наблюдения	15	15	15
	$t$ -статистика	-	1,65	1,65
	$p$ ( $T \leq t$ ) двухстороннее	-	<b>0,11</b>	<b>0,11</b>
	$t$ критическое двухстороннее	-	2,06	2,06
Время контакта	Среднее	3,96	3,37	3,04
	Дисперсия	2,00	1,63	1,68
	Наблюдения	15	15	15
	$t$ -статистика	-	1,19	1,84
	$p$ ( $T \leq t$ ) двухстороннее	-	0,24	0,08
	$t$ критическое двухстороннее	-	2,05	2,05

Для достоверности полученных результатов коэффициент  $p$  должен быть выше 0,05 (т.к. уровень значимости взят 0,05) [36, 107, 125], а так же коэффициент Стьюдента (в данном случае это  $t$ -статистика) должен быть меньше значения  $t$ -критического двухстороннего. Как видно из таблицы для всех параметров это

условие соблюдается, т.е. отклонение значений математической модели находится в пределах допустимого, а это значит, что полученные результаты являются верными.

#### **4.2. Учет оседания частиц адсорбента при моделировании значений параметров дезодорации**

При прогнозе дозирования активированного угля, его адсорбционной активности и времени контакта с водой следует так же учитывать осаждение частиц адсорбента при дезодорации. Это обосновано тем, что осевшие частицы активированного угля практически не сорбируют одорирующие вещества из питьевой воды.

Данные об осаждении активированного угля сформированы на основе результатов пробного углевания и пробного осаждения на СПВ «Пруд-Ижевск» [89, 138, 139].

Регрессионное моделирование процесса осаждения. Исходя из данных результатов экспериментального осаждения, при помощи методов дисперсионного анализа и регрессионной статистики [29, 36, 56, 125] составим уравнения, описывающие зависимость осаждения частиц активированного угля. Для начала на основе рассмотренных ранее данных [89, 138] составим таблицу зависимости оседания частиц от концентрации раствора и времени (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Время оседания угля марки ОУ-В. Данные о результатах пробного осаждения угля

№	Концентрация мг/дм <sup>3</sup>	Время контакта, мин	Масса осевших частиц, мг
1	10	5	0,4
2	15	5	0,65
3	20	5	0,9
4	25	5	0,95
5	30	5	0,97
6	10	10	0,7
7	15	10	1,18
8	20	10	1,65
9	25	10	1,85
10	30	10	1,9
11	10	15	0,98
12	15	15	1,64
13	20	15	2,3
14	25	15	2,7
15	30	15	2,79

Для того чтоб оценить возможность моделирования параметра осаждения активированного угля следует проанализировать связь между рассмотренными в таблице 4.4 показателями. Для определения силы связи проведем корреляционный анализ данных, а так же рассчитаем коэффициенты корреляции. Полученные результаты представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Коэффициенты корреляции для параметров осаждения

Показатель	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>	Время контакта, мин	Масса осевших частиц, мг
Концентрация мг/дм <sup>3</sup>	1	-	-
Время контакта, мин	0	1	-
Масса осевших частиц, мг	0,59	0,73	1

Коэффициенты корреляции более 0,5 из таблицы 4.5 свидетельствуют о высокой степени корреляционной связи статистических данных [36, 56]. Корреляция статистических данных между параметрами осаждения активированного угля

является свидетельством существования некоторой статистической связи в данной выборке. Как видно из таблицы 4.5, существует корреляционная зависимость между показателями осаждения частиц активированного угля и временем контакта, а так же концентрацией исходного раствора. Коэффициент корреляции между параметрами осаждения – время контакта и концентрация раствора равен нулю, что доказывает их независимость друг от друга, а так же адекватность проведенного анализа.

На основе проведенного корреляционного анализа и используя значения данных о пересечении из результатов дисперсионного анализа, составим формулу для расчета модели осаждения частиц активированного угля. Данные регрессионной статистики и дисперсионного анализа для экспериментальных измерений представлены в таблицах 4.6, 4.7.

Таблица 4.6 – Данные регрессионной статистики пробного осаждения

Параметр	Значение
Множественный R	0,94
R-квадрат	0,89
Нормированный R-квадрат	0,88
Стандартная ошибка	0,26
Наблюдения	15

Для разработки уравнения регрессионной статистики отражающего осаждение частиц активированного угля на основе времени контакта и концентрации раствора следует рассчитать коэффициенты уравнения, стандартную ошибку и коэффициент Стьюдента; результаты представлены в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Результаты регрессионного анализа

Параметр	Коэффициент уравнения	Стандартная ошибка	Коэффициент Стьюдента
Оседание частиц	-1,10	0,26	-4,23
Время, минуты	0,06	0,01	6,47
Концентрация раствора	0,13	0,02	7,98

Исходя из полученных результатов, составим формулу регрессионной модели оседания частиц активированного угля на основе времени контакта и концентрации раствора

$$Y_4 = -1,1 + 0,06 Y_3 + 0,13 Y_1, \quad (37)$$

где

$Y_4$  – оседание частиц, мг;

$Y_3$  – время контакта с водой, мин;

$Y_1$  – дозирование, мг/дм<sup>3</sup>.

Используя полученное уравнение, проведем моделирование процесса оседания частиц и сравним со значениями, которые были получены экспериментальным путем. Экспериментальные значения процесса оседания частиц и значения, полученные в результате моделирования, представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты, полученные при использовании модели и их сравнение с экспериментом:

Номер исследуемого измерения	Концентрация исходного раствора	Время, минуты	Осевшие частицы, эксперимент, мг	Осевшие частицы, модель, мг
1	10	5	0,4	0,25
2	15	5	0,65	0,55
3	20	5	0,9	0,85
4	25	5	0,95	1,15
5	30	5	0,97	1,45
6	10	10	0,7	0,9
7	15	10	1,18	1,2
8	20	10	1,65	1,5
9	25	10	1,85	1,8
10	30	10	1,9	2,1
11	10	15	0,98	1,55
12	15	15	1,64	1,85
13	20	15	2,3	2,15
14	25	15	2,7	2,45
15	30	15	2,79	2,75

На основе полученной таблицы построим график сравнения экспериментальных и рассчитанных данных (см. рисунок 4.4).

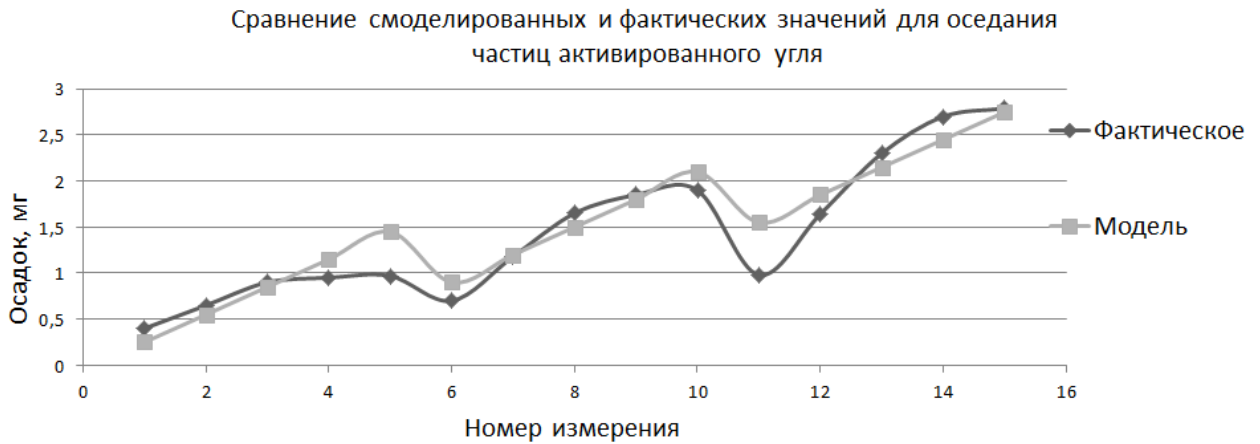


Рисунок 4.4 – График сравнения экспериментальных значений и спрогнозированных данных для оседания частиц активированного угля

Для оценки полученных при помощи корреляционного и регрессионного анализа результатов следует сравнить степень статистической зависимости между двумя переменными (моделью и фактическими значениями), а так же сравнить их дисперсии [29, 53]. Полученные результаты представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты математической описательной статистики

Показатели	Параметры	Эксперимент	Модель
Оседание частиц	Среднее	1,44	1,50
	Стандартная ошибка	0,19	0,18
	Стандартное отклонение	0,75	0,70
	Дисперсия выборки	0,56	0,49
	Уровень надежности (95,0%)	0,42	0,38

Для сравнения дисперсий двух вариационных рядов воспользуемся коэффициентом Фишера (5) [36]. В нашем случае критерий Фишера: оседания частиц активированного угля равен 1,14. Для подтверждения достоверности полученных результатов коэффициент критерия Фишера должен быть не выше 2,97 [29, 36] (если критерий Фишера более 2,97 - следовательно выборки разные), другими сло-

вами полученные результаты являются достоверными и находятся в установленных пределах.

Для определения степени статистической зависимости между двумя числовыми переменными рассчитаем коэффициент корреляции, воспользуемся формулой 6 [29, 36]. для оседания активированного угля равен 0,94. Для достоверности расчетов коэффициент корреляции должен быть выше |0,5|, в нашем случае это условие выполняется [29, 36, 53].

Кроме того, следует оценить отклонения фактических и вычисленных значений. Для этого следует определить коэффициент Стьюдента (при этом уровень значимости берем 0,05), а так же ввести коэффициент  $p$ , в результате расчетов значения которого должны быть выше уровня значимости.

Исходя из вышесказанного, проведем двухвыборочный  $t$ -тест с различными дисперсиями, полученные результаты представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Двухвыборочный  $t$ -тест с различными дисперсиями

Вещество	Параметры	Фактическое	Модель
Оседание частиц активированного угля	Среднее	1,44	1,50
	Дисперсия	0,56	0,49
	Наблюдения	15	15,00
	$t$ -статистика	-0,24	-0,24
	$p(T \leq t)$ двухстороннее	<b>0,82</b>	<b>0,82</b>
	$t$ критическое двухстороннее	2,05	2,05

Для достоверности расчетов коэффициент  $p$  должен быть выше 0,05 (т.к. уровень значимости взят 0,05) [36], а так же коэффициент Стьюдента (в данном случае это  $t$ -статистика) должен быть меньше значения  $t$ -критического двухстороннего. Как видно из таблицы для всех параметров это условие соблюдается, т.е. отклонение значений математической модели находится в пределах допустимого, а это значит, что полученные результаты являются адекватными.



### 4.3. Применение полученных результатов в качестве интеллектуальной системы поддержки принятия решений для технологического процесса дезодорации питьевой воды

Учитывая разработанные уравнения на основе обученной ИНС (Приложение В) и регрессионного анализа данных для значений основных параметров адсорбента дезодорации питьевой воды (31)-(36), а так же учитывая модель оседания частиц активированного угля, была разработана таблица полученных в результате моделирования значений параметров адсорбента (см. таблица 4.11). В уравнениях нейрорегрессии использовалось меньшее количество параметров исходной воды, чем в уравнениях полученных при помощи регрессионного анализа нейронной сети, поэтому в данном случае результаты, полученные при помощи уравнений нейрорегрессии, будут содержать большее отклонение от фактических значений.

Таблица 4.11 – Полученные в результате моделирования данные на основе разработанных уравнений регрессии и нейрорегрессии для ИНС

№	Фактические значения			Модельные значения		
	Дозир-ние угля	Адсорбцион. активность	Время контакта	Дозир-ние угля	Адсорбцион. активность	Время контакта
Уравнения регрессии						
1	0,8	180,00	2	0,40	178,47	1,24
2	5,5	180,00	2,00	1,18	181,61	1,47
3	9,9	212,71	3,95	6,58	198,91	3,41
4	11	225,00	5,25	12,68	221,39	4,98
5	16	225,00	6,00	16,66	235,59	5,14
6	16	225,00	5,65	15,78	232,81	5,14
7	16,7	212,71	4,65	8,38	204,44	3,66
8	6	180,00	3,65	4,98	196,95	3,06
9	0,9	182,80	2,00	2,09	178,32	1,89
10	5,6	215,93	2,90	3,43	185,86	1,93
11	3,93	225,00	3,50	9,97	201,03	3,72
12	8,28	225,00	3,50	10,69	208,48	3,64
13	14,1	225,00	6,00	11,93	214,59	4,03
14	13,7	225,00	5,00	11,80	218,83	4,18
15	6,16	215,93	3,30	6,54	201,70	3,06

Продолжение таблицы 4.11

№	Фактические значения			Модельные значения		
	Дозир-ние угля	Адсорбцион. активность	Время контакта	Дозир-ние угля	Адсорбцион. активность	Время контакта
Уравнения нейрорегрессии						
1	0,8	180,00	2	1,16	178,47	0,93
2	5,5	180,00	2,00	1,77	181,61	1,14
3	9,9	212,71	3,95	5,39	198,91	3,03
4	11	225,00	5,25	10,79	221,39	4,65
5	16	225,00	6,00	15,59	235,59	4,86
6	16	225,00	5,65	15,02	232,81	4,91
7	16,7	212,71	4,65	7,09	204,44	3,32
8	6	180,00	3,65	3,69	196,95	2,73
9	0,9	182,80	2,00	1,58	178,32	1,48
10	5,6	215,93	2,90	4,04	185,86	1,59
11	3,93	225,00	3,50	9,43	201,03	3,35
12	8,28	225,00	3,50	10,34	208,48	3,30
13	14,1	225,00	6,00	11,31	214,59	3,70
14	13,7	225,00	5,00	11,24	218,83	3,90
15	6,16	215,93	3,30	6,18	201,70	2,78

Для расчета степени статистической зависимости, а так же оценки достоверности полученных результатов между вычисленными и фактическими значениями, следует рассчитать коэффициент корреляции (16) [36]. Для дозы активированного угля коэффициент корреляции равен 0,81 (нейронная сеть) и 0,97 (нейрорегрессия).

Среднее расхождение между фактическими и полученными при помощи модели значениями в период с 2004 по 2012 год составило: для дозирования сорбента 1,39% (0,07мг/л), его адсорбционной активности -0,06% (-0,12 мг/г)) и времени контакта с очищаемой водой -0,4% (-0,012 минут)).

При помощи результатов полученных на основе обученной ИНС, были также определены значения параметров адсорбента на 2013 и 2014 годы. В таблице 4.12 представлено сравнение фактических и модельных значений.

Таблица 4.12 – Сравнение фактических и модельных значений полученных на основе обученной нейронной сети

№	Фактические значения			Модельные значения ИНС		
	Дозир-ние угля	Адсорбцион. активность	Время контакта	Дозир-ние угля	Адсорбцион. активность	Время контакта
1	0,80	180,00	2,00	0,85	180,93	2,00
2	5,50	180,00	2,00	5,30	180,93	1,99
3	9,90	212,71	3,95	9,90	202,88	3,95
4	11,00	225,00	5,25	14,58	225,00	5,25
5	16,00	225,00	6,00	14,58	225,00	6,00
6	16,00	225,00	5,65	14,58	225,00	5,65
7	16,70	212,71	4,65	14,58	212,71	4,64
8	6,00	180,00	3,65	6,00	202,88	3,65
9	0,90	182,80	2,00	0,85	180,93	2,00
10	5,60	215,93	2,90	5,30	202,88	2,89
11	3,93	225,00	3,50	5,30	225,00	3,50
12	8,28	225,00	3,50	8,28	225,00	3,50
13	14,10	225,00	6,00	14,58	225,00	5,99
14	13,70	225,00	5,00	14,58	225,00	5,00
15	6,16	215,93	3,30	5,30	215,93	3,29

На основе разработанной таблицы были составлены графики сравнения фактических и модельных значений для параметров дозирования активированного угля, адсорбционной активности, времени контакта сорбента с водой (см. рисунки 4.5-4.7).

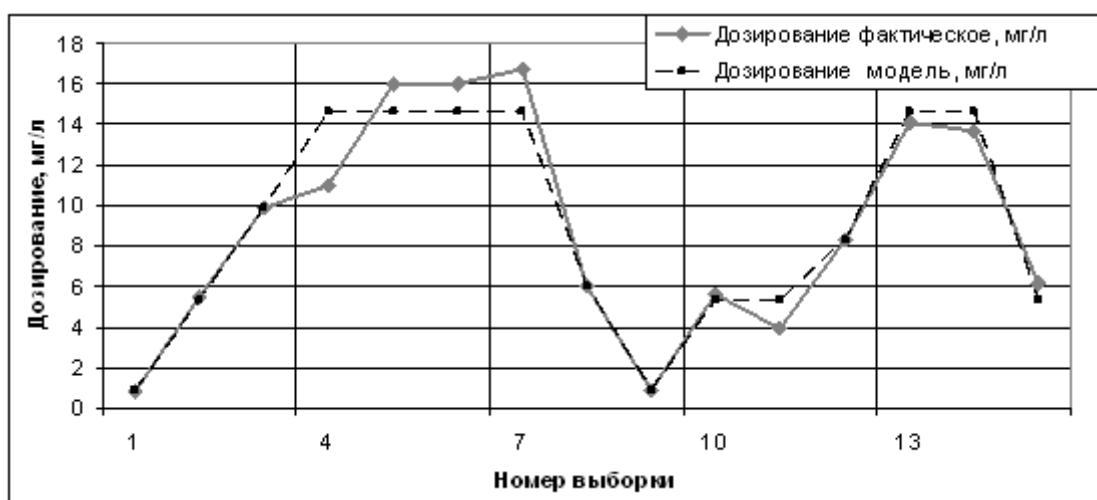


Рисунок 4.5 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра дозирования активированного угля

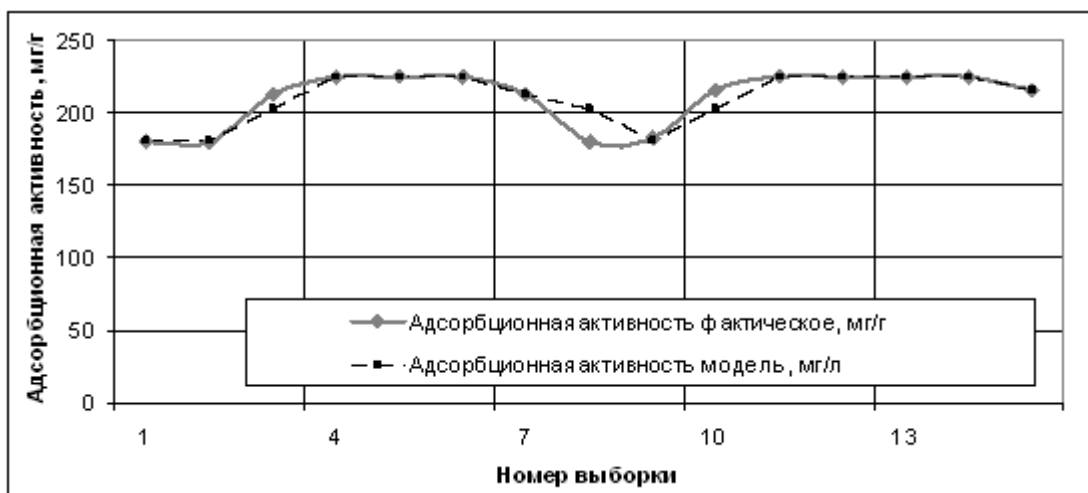


Рисунок 4.6 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра адсорбционная активность

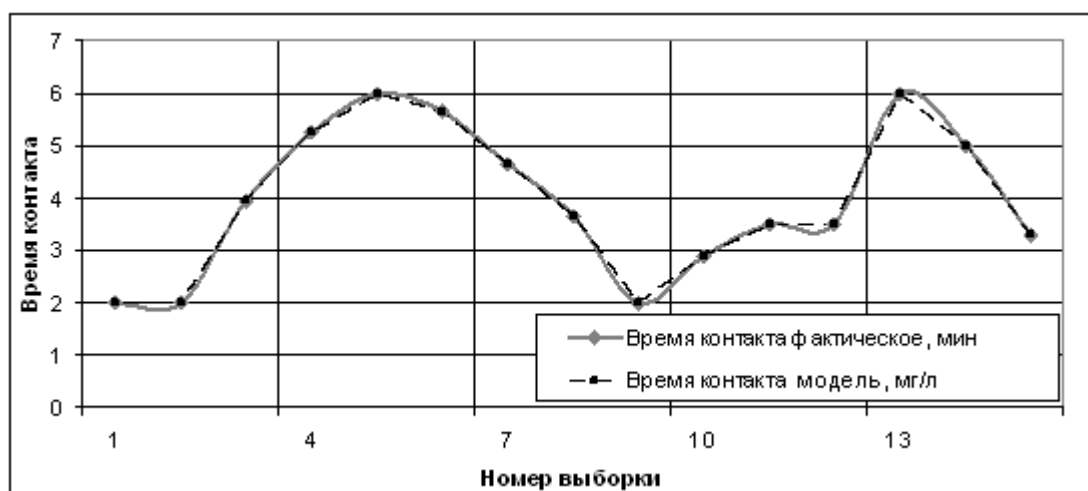


Рисунок 4.7 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра время контакта сорбента с водой

Полученные на основе обученной нейронной сети результаты хорошо аппроксимируют фактические данные: средняя ошибка аппроксимации для дозирования активированного угля составила 9,5%, для адсорбционной активности 1,7%, для времени контакта сорбента с водой – в пределах 1%. Моделирование при помощи уравнений нейрорегрессии дает большую ошибку: для дозирования активированного угля с учетом осаждения частиц средняя ошибка аппроксимации составила 38,1%, для адсорбционной активности 5,3%, для времени контакта сорбента с водой 16,7%, что говорит о преимуществе применения обученной ИНС

над уравнениями нейрорегрессии в области моделирования значений основных показателей процесса дезодорации. Тем не менее, применение только ИНС без регрессионного анализа затруднено в силу невозможности оценки адекватности полученных результатов, а также проведения дополнительных исследований в области моделирования и прогнозирования значений параметров дезодорации.

#### **4.4. Использование разработанных методик для рассматриваемой системы водоснабжения**

Была доказана возможность применения нейрорегрессионного моделирования для решения поставленных в работе задач. Полученные уравнения не только хорошо аппроксимируют фактические данные, но и могут быть использованы для прогноза параметров адсорбента (в данном случае активированного угля) при процессе дезодорации воды.

Применение нейронных сетей и регрессионного анализа данных возможно для корректировки значений параметров технологического процесса дезодорации, однако полученные результаты и уравнения весьма специфичны для каждого случая и поэтому должны разрабатываться заново для других предприятий и источников питьевой воды. Алгоритмы для расчетов из данной работы могут быть так же применены в сторонних организациях.

Возможность применения модели доказана на независимой выборке сформированной по данным МУП «Ижводоканал» за 2013-2014 год: остаток сорбента после сезонной очистки воды от одорирующих веществ на предприятии составил 39 тонн, в то время как вычисленное значение остатка сорбента составило всего лишь 19 килограмм в 2013 и 17 килограмм в 2014 год соответственно. Применение разработанной нейрорегрессионной модели позволило бы снизить остаток сорбента на рассматриваемом предприятии на 99,89% (с 9,0 тонн до 19 килограмм марки угля ОУ-В) в 2013 год и на 99,95% (с 30 тонн до 17 килограмм смеси марок ОУ-А и ОУ-В) в 2014 год. При средней закупочной стоимости предприятием ак-

тивированного угля в 80 рублей за килограмм можно было сэкономить средства в размере 718640 рублей в 2013 году и около 2 миллионов рублей в 2014 году.

### **Выводы по главе**

Проведена проверка адекватности полученных результатов для основных параметров дезодорации питьевой воды на фактических данных в период с 2013 по 2014 год за каждый теплый месяц когда применялся активированный уголь для дезодорации воды. Полученные результаты представлены в таблицах 4.1 и 4.2. Для определения значимых различий между групповыми средними в установке дисперсионного анализа (моделью и фактическими значениями) были рассчитаны критерии Фишера:

- для дозы активированного угля равен 2,31 - нейронная сеть и 2,79 – уравнение нейрорегрессии;
- для адсорбционной активности равен 2,33 - нейронная сеть и такой же коэффициент для нейрорегрессии;
- для времени контакта равен 1,23 - нейронная сеть и 1,19 – нейрорегрессия.

Для определения статистической зависимости между модельными и фактическими значениями были рассчитаны коэффициенты корреляции:

- для дозы активированного угля равен 0,71 -нейронная сеть и 0,69 - нейрорегрессия;
- для адсорбционной активности равен 0,75 - нейронная сеть и такой же коэффициент для нейрорегрессии;
- для времени контакта равен 0,92 - нейронная сеть и 0,93 для нейрорегрессии.

Кроме того, для оценки отклонения фактических и вычисленных значений был проведен двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями (результаты представлены в таблице 4.3), в ходе которого была доказана адекватность полученных результатов.

Для более точного моделирования процесса дезодорации был введен параметр осаждения частиц активированного угля при его нахождении в очищаемой воде, при помощи которого производилась корректировка дозирования адсорбента с учетом времени контакта и концентрации. Моделирование параметра проводилось по результатам пробного осаждения МУП «Ижводоканал», за основу расчетов были взяты концентрация раствора вода-адсорбент, а так же время контакта с водой. Получена формула регрессионной модели оседания частиц активированного угля (30).

Достоверность расчетов была проверена при помощи критерия Фишера (для модели оседания частиц активированного угля он равен 1,14), коэффициента корреляции (коэффициент корреляции равен 0,94), а так же двухвыборочного t-теста (результаты в таблице 4.10).

При помощи результатов полученных на основе нейронной сети и регрессионного анализа (14)-(19), а так же с учетом разработанной модели оседания частиц активированного угля (20), были составлены таблицы данных, в которых приведено сравнение фактических и полученных значений для параметров адсорбента на 2013 и 2014 годы (см. данные таблиц 4.11, 4.12).

Возможность применения модели показана на независимой выборке сформированной по данным МУП «Ижводоканал» за 2013 и 2014 год. Остаток сорбента после сезонной очистки воды от одорирующих веществ на предприятии составил 39 тонн, в то время как модельное значение остатка сорбента составило всего лишь 19 килограмм в 2013 и 17 килограмм в 2014 год соответственно. Применение разработанной нейрорегрессионной модели позволило бы снизить остаток сорбента на рассматриваемом предприятии на 99,89% (с 9,0 тонн до 19 килограмм марки угля ОУ-В) в 2013 год и на 99,95% (с 30 тонн до 17 килограмм смеси марок ОУ-А и ОУ-В) в 2014 год. При средней закупочной стоимости предприятием активированного угля в 80 рублей за килограмм можно было сэкономить средства в размере 718640 рублей в 2013 году и около 2 миллионов рублей в 2014 году

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлена корреляция численных значений параметров исходной и питьевой воды в системах водоочистки при проведении процесса дезодорации. Было установлено, что концентрация геосмина в питьевой воде в первую очередь зависит от концентрации сине-зеленых водорослей, запаха, БПК, мутности и цветности в исходной воде (коэффициенты корреляции при этом 0,9; 0,5; 0,5; 0,7; 0,6 соответственно), концентрация хлороформа и хлоридов - от запаха, БПК, сине-зеленых водорослей (0,6; 0,9; 0,6 соответственно). На основе проведенного анализа разработана методика, которая позволяет выявить связь между значениями исходной и питьевой воды в области дезодорации. Применение данной методики позволит более точно определить недостатки технологических схем на предприятиях водоподготовки в области удаления ароматических соединений.

2. Разработанные на основе МГК и МНК модели, позволяют определить значения параметров питьевой воды исходя из качества исходной воды на городских очистных сооружениях при проведении технологического процесса дезодорации. Полученные при помощи модели значения для рассматриваемого предприятия укладываются в нормы СанПиН 2.1.4.1074-01.

3. Разработан алгоритм управления технологическим процессом дезодорации питьевой воды, базирующийся на применении ИНС глубокого обучения. Были скорректированы значения для дозирования сорбента, его адсорбционной активности и времени контакта.

Среднее расхождение между полученными при помощи модели и фактическими значениями для данных обучения ИНС составило: для дозирования сорбента 1,39%, его адсорбционной активности - 0,06% и времени контакта с очищаемой водой - 0,4%.

Достоверность полученных результатов была доказана при помощи критерия Фишера (при доверительной вероятности 0,95 составил для дозирования ПАУ – 23,22, адсорбционной активности – 81,15, времени контакта с питьевой водой – 43,19; (при табличных значениях 2,53, 2,53 и 2,54 соответственно)), коэффициен-



тов корреляции (для дозирования - 0,71, для адсорбционной активности 0,75, для времени контакта 0,92), средней ошибки аппроксимации (дозирования ПАУ-9,5%; адсорбционной активности - 1,7%; времени контакта сорбента с водой – в пределах 1%).

4. Разработана методика, позволяющая адаптировать систему водоочистки к изменяющимся параметрам источников питьевого водоснабжения, базирующаяся на нейрорегрессионном моделировании. На примере тестовой выборки, сформированной по данным предприятия, ежегодный остаток после сезонной дезодорации воды теоретически можно снизить от 99,89% (с 9,0 тонн до 19 килограмм ПАУ марки ОУ-В) до 99,95% (с 30 тонн до 17 килограмм смеси марок ОУ-А и ОУ-В) без учёта резервного запаса сорбента. При средней закупочной стоимости предприятием ПАУ в 80 рублей за килограмм можно было теоретически сократить затраты от 718640 до 2 миллионов рублей.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- АУ активированный уголь
- МГК - метод главных компонент
- МНК – метод наименьших квадратов
- ПАУ порошкообразный активированный уголь
- ГАУ гранулированный активированный уголь
- МУП муниципальное унитарное предприятие
- БК биологическое потребление кислорода
- СПВ станция подготовки воды
- ПАВ поверхностно-активные вещества
- СПАВ синтетически поверхностно-активные вещества
- ПДК предельно допустимая концентрация
- ХПК химическое потребление кислорода
- ВУ водопроводный узел
- МИБ метилизоборнеол
- ОС окружающая среда
- ГУП государственное унитарное предприятия
- ЗСО зоны санитарной охраны
- ИЭМЗ Ижевский электромеханический завод
- ОАО открытое акционерное общество
- РЧВ резервуар чистой воды
- СВЧ сверхвысокочастотное излучение
- ТЭЦ теплоэлектроцентраль
- ЦГСЭН центр государственного санитарно-эпидемиологического надзора
- ИНС искусственная нейронная сеть
- Адс. Акт. адсорбционная активность
- С.-т. санитарно-токсикологический
- Орг. органолептический

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Н. Н. Водоснабжение. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1974. 480 с.
2. Амросьева Т.В. Современные подходы к изучению и оценке вирусного загрязнения питьевых вод // Гигиена и санитария. – 2002. - №1. – С. 18-21.
3. Ананьин Н.И., Волобоев Н.А. Подашвалов Б.Ю. Влияние микроэлементного состава, жесткости и нитритов питьевой воды на заболеваемость населения злокачественными новообразованиями // Здравоохранение Казахстана. – 1983. - №1. – С. 15-17.
4. Анализ МУП г. Ижевска «Ижводоканал» условий и качества подготовки питьевой воды из Ижевского водохранилища в 2009г.: Доклад на попечительский совет (2009, Ижевск). Ижевск, 2009. 9 с.
5. Анил К. Джейн, Жианчанг Мао, Моиуддин К. М. Введение в искусственные нейронные сети //Открытые системы - 1997. - № 4 - С. 31-44.
6. Архипчук В.В., Гончарук В.В. Проблемы качества питьевых бутылированных вод // Химия и технология воды. – 2004. – Т.26, №4. – С. 403-413.
7. Бабенков Е.Д. Коагулянты в очистке воды. – М.: Наука, 1084. – 258 с.
8. Балашова В.В., Горяинова Г.С. Повреждение систем водоснабжения биообрастаниями // Водоснабжение и санитарная техника. – 1991. - № 6. – С. 24-25.
9. Бекренев А.В., Русанова Л.П., Викторовский И.В., Воякина Е.Ю., Жаковская З.А., Кухарева Г.И., Хорошко Л.О., Чернова Е.Н. Возникновение запаха воды и его удаление на водопроводных станциях Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 9, ч.1. С. 17-22.
10. Белецкая М.Г. Синтез углеродных адсорбентов методом термохимической активации гидролизного лигнина с использованием гидроксида натрия: дисс. к-та техн. наук – Архангельск, 2014. – 153 с.
11. Бертокс П., Радд Д. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений. – М.: Мир, 1980. – 606 с.

12. Берюх А.Ф. Санитарно-гигиеническая оценка экологического риска влияния деятельности предприятий химической промышленности на состояние водной среды и здоровье населения: дисс. к-та биолог-х наук – Петрозаводск, 2011. – 194 с.
13. Благодатский Г. А., Бас А. А., Горохов М. М., Пономарёв Д. С., Системный анализ показателей исходной воды при производстве питьевой воды в системе центрального водоснабжения // Интеллектуальные системы в производстве – 2018. №2(16) С. 84-96.
14. Блинов С.В. Практикум применения пакета BrainMaker для прогнозирования на финансовых [Электронный ресурс] – Режим доступа: [rbiNКах//http://win.aha.ru/~mdo/office/bm\\_fin.htm](http://win.aha.ru/~mdo/office/bm_fin.htm).
15. Беликова С.Е. Водоподготовка: Справочник./ Под ред. С.Е. Беликова. М. : Аква-Терм, 2007. - 240 с.
16. Белоконова Н.А., Корюкова Л.В., Обожин А.Н., Устюжанинов В.В. Использование неорганического флокулирующего сорбента СФ-АІ в технологии подготовки питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 9. С. 33-36.
17. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение. - М.: Мир, 2001.- 219 с.
18. Борисов Б.М., Любавина Е.А. Окислительно-сорбционный метод при осветлении, обесцвечивании и дезодорации природных вод // Научно-технический сборник № 63. Коммунальное хозяйство городов. 2005. С. 141-146.
19. Борисов В. В., Круглое В. В., Харитонов Е. В. Основы построения нейронных сетей. - Смоленск: Изд-во Военного ун-та войсковой ПВО ВС РФ, 2002. - 193 с.
20. Борисов Ю., Кашкаров В., Сорокин С. Нейросетевые методы обработки информации и средства их программно-аппаратной поддержки// Открытые системы. - 2001. - № 4. - 215 с.
21. Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 384 с.

22. Бэстенс Д.Э., Ван Ден Берг В.-М., Вуд Д. Нейронные сети и финансовые рынки. Принятие решений в торговых операциях. -М.: Изд-во ТВП, 2003. - 215 с.
23. Бэстенс Д.Э., ван ден Берг В.-М., Вуд Д. Нейронные сети и финансовые рынки: принятие решений в торговых операциях. - М.: ТВП, 1997. - 298 с.
24. И.Н. Варнавский, Установка ВИН-2 для получения очищенной биологически активной целебной питьевой воды: А.с. 1799367 А3 SU, С 02 F 9/00, В 01 D 19/00. / И.Д. Конозенко, М.В. Курик, Г.Ф. Зимоглядов (СССР). - Заявл. 15.12.91; Оpubл. 28.02.93, Бюл. № 8. – 6 с.
25. Васильев А.Н. Нейросетевое моделирование в математической физике: автореф. дисс. д-ра физ-мат. наук - Санкт-Петербург, 2007. – 31 с.
26. Васильев В. И. Распознающие системы -Киев: Наукова думка, 1988. - 198 с.
27. Васюков А.Е. Химические аспекты экологической безопасности поверхностных водных объектов // Химия и технология воды. – 2005. – Т. 27, №3. – С. 294-308.
28. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Финансы и статистика, 2003. – 216 с.
29. Вучков И, Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ. М. :Финансы и статистика, 2001. – 119 с.
30. Габричидзе Т.Г. Комплексная многоступенчатая система безопасности критически важных, потенциально опасных объектов: дисс. докт. техн. наук. - Ижевск, 2008. - 406 с.
31. Галушкин А. И. Современные направления развития нейрокомпьютеров// Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1998. - №1. – С. 16-17.
32. Гелиг А. Х. Динамика импульсных систем и нейронных сетей. -Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. - 191 с.
33. Гальперин Е.М. О терминах и определениях в водоснабжении / Водоснабжение и санитарная техника. – 1999. - №12.– С. 23–24.

34. Гвоздяк П.И. Освобождение воды от микроорганизмов // М.Н. Ротмистров, П.И. Гвоздяк, С.С. Ставская Микробиология очистки воды. – К.: Наукова думка, 1978. – С. 184-223.
35. Герасимов М.М. Разработка методов повышения барьерных функций очистных сооружений водопроводов в отношении антропогенных загрязнений: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 185 с.
36. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М. : Высшая школа, 2003. - 403 с.
37. Голубева Н.С. Разработка адсорбционной технологии очистки сточных вод коксохимического производства: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Барнаул, 2013. – 16 с.
38. Гончарук В.В., Вакуленко В.Ф., Захалыко В.А. Влияние точки ввода хлора в технологической цепи на хлоропоглощаемость воды и образование хлороформа // Химия и технология воды. – 1998. – Т.20, №4. – С. 409-421.
39. Горбань А. Н. Обучение нейронных сетей. -М.: СП Параграф, 1991. – С. 56-59.
40. Горбань А. Н., Россиев Д. А. Нейронные сети на персональном компьютере. — Новосибирск: Наука, 1996. – С. 119-121.
41. Горбань А. Н., Дунин-Барковский В. Л., Миркес Е. М. Нейроинформатика. - Новосибирск: Наука, 1998. – С. 187-194.
42. Горохов М. М., Пономарёв С. Б., Вологдин С. В., Благодатский Г. А., Пономарёв Д. С.. Informatization of the quality of medical care in the management of the medical service of the federal penitentiary service of Russia. Proceedings of the IV international research conference information technologies in science, management, social sphere and medicine (ITSMSSM 2017), Tomsk, volume 72. 2017 – p. 481.
43. ГОСТ 2761-84 Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения.
44. ГОСТ 3351-74 Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности.

45. ГОСТ Р 51232-98 Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.
46. Грабовский П.А., Карпов И.П., Ларкина Г.М., Прогульный В.И., Триль А.А. Технологии доочистки воды в системах питьевого водоснабжения // ЭТЭВК: Сб. докл. Межд. Конгресса. – Харьков: «Изд. Проспект». – 1999. – 324 с.
47. Способ приготовления минерализованной питьевой воды: А.с. 1608138 А 1 RU, С 02 F 1/68. / В.А. Громько, Ю.Б. Васильев, В.Б. Гайдадымов, Е.Л. Золотарева (Россия); Заявл. 12.01.90. – Оpubл. 23.11.90, Бюл. № 43. –6 с.
48. Губанов В.А., Ковольджи А.К. Выделение сезонных эффектов на основе вариационных признаков // Экономика и математические методы. – 2001. – Т.37, №1. – С. 1678-1691.
49. Гусев Е.Е. Одорирующие вещества биологического происхождения в природных водах и способы их удаления при водоподготовке: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Москва, 2007. – 30 с.
50. Гутенев В.В. Повышение экологической безопасности систем питьевого водоснабжения: дисс. докт-ра техн. наук. – Нижний Новгород, 2004. – 440 с.
51. Устройство для биологической очистки водотоков и/или водоемов: А.с. 1362710 СССР, МКИ С02 F 3/32. / А.П. Гусак, Ф. В. Стольберг, В.Н. Затыльников (СССР); Заявл. 24.10.86. – Оpubл. в Б.И. 1987, Бюл. № 48 – 3 с.
52. Дегремон. Технические записки по проблемам воды / Под ред. Т.А. Карюхиной, И.Н. Чурбановой. – М.: Стройиздат, 1983. – Т 1-2. – 1064с.
53. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. - 550 с.
54. Дли М. И., Круглое В. В., Осокин М. В. Локально-аппроксимационные модели социально-экономических систем и процессов. - М.: Наука. Физматлит, 2000. – 211 с.
55. Документация по Excel Neural Network. Компания НейроОК. Москва, 2001. - 57 с.
56. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, т.1 - 1986. – 251 с.

57. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. - М. Мир, 1976. - 511 с.
58. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. М. : Химия, 1995. - 368 с.
59. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики / Под ред. И.И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, 1995. – 406 с.
60. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
61. Енютина С.Г. Математическое моделирование как основа энергосбережения в процессе дезодорации: дисс. канд. техн. наук. – Красноярск, 2000. – 148 с.
62. Ерастова Н. В. Гигиеническое обоснование интегральной оценки питьевой воды по показателям химической безвредности диссертация на соискание звания кандидата медицинских наук: автореф. дисс. канд. мед. наук. – Санкт-Петербург, 2014. – 23 с.
63. Выявление причин образования запаха питьевой воды в г. Ижевске и разработка рекомендаций по его предотвращению на основании полученных данных: Отчет о НИР (Заключ.)/ ГУ НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н.Сысина; Руководитель З.И. Жолдакова. М., 2006. - 94 с.
64. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. Том 2. Очистка и кондиционирование природных вод. М. : Издательство АСВ, 2004. - 496 с.
65. Журнал по проведению пробного коагулирования и пробного хлорирования воды / СПВ «Пруд-Ижевск». Ижевск, 2006. - 96 с.
66. Зарубин Г.П., Овчинкин И.П. Санитарные вопросы водоснабжения и канализации. – М.: Медицина, 1974. – 320 с.
67. Зайцев В.А. К теории стабилизации управляемых систем: дисс. докт. физ.-мат. наук. - Ижевск, 2015. - 293 с.
68. Змитрович А. И. Интеллектуальные информационные системы. - Минск: НТООО ТерраСистемс, 1997. – 127 с.



69. Зоеман Б. Органолептическая оценка качества воды. М.: Стройиздат, 1984. - 68 с.
70. Зорина Е.И. Активированные угли для водоподготовки. // Водоснабжение и сан.техника. – 2001. - №5. – ч.2. – С. 7-12.
71. Зуев Е.Т., Фомин Г.С. Питьевая и минеральная вода. Требования мировых и европейских стандартов к качеству и безопасности. – М.: Протектор, 2003. – 320 с.
72. Ивахненко А.Г. Перцептрон - система распознавания образов/ Киев Наукова думка, 1975. – 432 с.
73. Ивчатов А.Л., Малов В.И. Химия воды и микробиология. М.: ИНФРА-М, 2006. - 218 с.
74. Исаков В.Г., Абрамова А.А., Дягелев М.Ю. Сравнительный анализ причин дорожно-транспортных происшествий по сопутствующим дорожным условиям на примере г.Ижевска // Вестник ИжГТУ, Ижевск, 2012. - №4 – С. 119-122.
75. Итоги деятельности по оздоровлению Ижевского водохранилища и обеспечению населения г.Ижевска питьевой водой по 2009 г.: Резолюция заседания Попечительского совета Ижевского водохранилища (2009, Ижевск). Ижевск, 2009. – 6 с.
76. Калашникова Е.Г., Арутюнова И.Ю., Смирнов А.Д. Исследование различных методов дезодорации воды при водоподготовке // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. № 1. С. 17-25.
77. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей: пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2001. – 289 с.
78. Каримов Р.Х. Программное обеспечение расчетов систем водоподдачи // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. - №11. – С. 26–27.
79. Карюхина Т.А., Чурбанова И.Н. Химия воды и микробиология: Учеб. для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1995. - 208 с.
80. Кичигин В.И., Палагин Е.Д. Комплексная оценка качества природных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. - №7. – С. 11-15.

81. Способ управления процессом работы системы водоснабжения: А.с. 1675507 А 1 SU, Е 03 В 11/16. / В.Н. Коваленко, А.Н. Малишевский, В.А. Петросов (СССР). - Заявл. 05.03.90; Оpubл. 07.09.91, Бюл. № 33. – 5 с.
82. Способ управления работой системы водоснабжения: А.с. 1649051 А 1 SU, Е 03 В 11/16. / В.Н. Коваленко, В.П. Чупис, А.Н. Малишевский, В.А. Петросов – Оpubл. 15.05.91, Бюл. № 18. – 4 с.
83. Когановский А. М., Клименко Н. А., Левченко Т. М., Марутовский Р. М., Рода И. Г. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении. М.: Химия, 1983. - 288 с.
84. Когановский А.М. Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. Киев: Наук. думка, 1983. - 240 с.
85. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Рода И.Г. Адсорбция органических веществ из воды. Л.: Химия, 1990. - 256 с.
86. Когановский А.М., Левченко Т.М., Кириченко В.А. Адсорбция растворенных веществ. Киев: Наук. думка, 1977. - 224 с.
87. Когановский А.М., Левченко Т.М., Киселева З.Л. Новые методы очистки сточных вод в химической промышленности. Укр НИИНТИ, Киев, 1971. - 28 с.
88. Когановский А.М., Клименко Н.А. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении. – М.: Химия, 1983. – 288 с.
89. Количественный химический анализ. Производственный отчет / Лаборатория технологического контроля СПВ «Пруд-Ижевск». Ижевск, 2009. – 48 с.
90. Круглов В.В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. -2-е изд., стереотип. - М.: Горячая линия-Телеком, 2002. - 382 с.
91. Круглов В. В , Борисов В В , Харитонов Е. В. Нейронные сети конфигурации обучение, применение // Изд-во Моек энерг ин-та фил-л – Смоленск, 1998. – 215 с.
92. Кузубова Л.И., Кобрина В.Н.Химические методы подготовки воды (хлорирование, озонирование, фторирование): Аналитический обзор./ СО РАН, ГННТБ, НИОХ. Новосибирск, 1996. - 132 с.

93. Кульский Л.А., Гороновский И.Т., Когановский А.М., Шевченко М.А. Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды. В 2-х частях. Киев: Наук. думка. 1980. – 1206 с.
94. Кургузкин М.Г., Измайлова А.Р., Куюмчев О.С. Экореконструкция Ижевского пруда // Промышленная и экологическая безопасность. 2008. № 7. С. 74-78.
95. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы Обзор и состояние // Новости искусственного интеллекта 1998 -№3. - С. 130-135.
96. Кутковец А. А. Экологическая оценка питьевой воды и системы подготовки её для нужд населения: дисс. канд. биологич. наук. – Кострома, 2009. -132 с.
97. Куффлер С, Николе Дж. От нейрона к мозгу - М Мир, 1979. – 119 с.
98. Логовский А. С. Зарубежные нейропакеты современное состояние и сравнительные характеристики // Нейрокомпьютер, 1998. – 56 с.
99. Макаренко А.А. Алгоритмы и программная система классификации полутоновых изображений на основе нейронных сетей: диссер. канд. техн. наук – Томск, 2007. – 117 с.
100. Матвейкин В.Г. Математическое моделирование и управление процессом короткоциклового безнагревной адсорбции /В.Г. Матвейкин, В.А. Погонин, С.Б. Путин, С.А. Скворцов. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2007. - 140 с.
101. Мешалкин А.В., Дмитриева Т.В., Стрижко Л.С. Экохимический практикум/Под общей ред. А.П. Коржавого. – М.: «САЙНС-ПРЕСС», 2002. – 240 с.
102. Способ определения экологического состояния водоемов А.с. 2492641 RU, А01К61/00. / Муллаянов Р. Р. Елизарьев А.Н. Красногорская Н.Н., Хаертдинова Э.С., Опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. – 8 с.
103. Насонкина Н. Г. Повышение экологической безопасности систем питьевого водоснабжения: дис. д-ра техн. наук. - Донецк, 2006. – 314 с.
104. В.А.Никашина, Э.М.Кац, И.Б.Серова Очистка артезианской питьевой воды от иона аммония на природном клиноптилолитсодержащем туфе. Математическое моделирование и расчет процесса сорбции. //М.: Сорбционные и хроматографические процессы, 2008. С. 23-29.

105. Огнев И. В., Борисов В. В. Ассоциативные среды – М.: Радио и связь, 2000. - 256 с.
106. Пааль Л.Л.Справочник по очистке природных и сточных вод./ Л.Л. Пааль, Я.Я. Кару, Х.А. Мельдер. М. : Высшая школа, 1994. - 336 с.
107. Петрович М. Л. Регрессионный анализ и его математическое обеспечение. М.: Финансы и статистика, 2002. - 982 с.
108. Помосова Н.Б., Становских А.А., Синицина О.О., Герасимов М.М. Проблемы водоподготовки в условиях эвтрофикации источника питьевого водоснабжения г. Ижевска // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 8. С. 25-27.
109. Помосова Н.Б., Становских А. А., Ткачук Е.А. Проблемы водоснабжения г. Ижевска в условиях эвтрофированного водоисточника // Водоснабжение и санитарная техника. 2005. № 7. С. 22-27.
110. Пономарёв Д.С. Разработка и анализ математической модели процесса дезодорации природных вод по технологии МУП «Ижводоканал», Ижевск, 2013. – 121 с.
111. Способ оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме. А.с. 2559561 RU, A01K61/00 / Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Пономарёв С.Б., Гаврилов С.А – Оpubл.: 14.07.2015.
112. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г., Пономарева А.С., Программа для оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в пресноводном водоеме. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014662091. Дата регистрации 24.11.2014.
113. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г., Пономарева А.С. Расчет расхода активированного угля марки ОУ-В для очистки воды от геосмина. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015619352. Дата регистрации 01.09.2015.
114. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Регрессионное моделирование концентрации хлоридов в питьевой воде на основе данных МУП «Ижводоканал». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2015661214. Дата регистрации 21.10.2015.

115. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Регрессионное моделирование концентрации хлороформа в питьевой воде на основе данных МУП «Ижводоканал». Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2015661548. Дата регистрации 29.10.2015.
116. Пономарёв Д.С. Исаков В.Г. Регрессионное моделирование концентрации геосмина в питьевой воде на основании данных МУП «Ижводоканал» // Интеллектуальные системы в производстве. - 2015. №2(26) С. 107-108.
117. Пономарёв Д.С. Исаков В.Г. Математическая модель определения концентрации геосмина в питьевой воде // Вестник ИжГТУ имени М.Т.Калашникова. – 2015. №2 С. 59-60.
118. Пономарёв Д.С. Нейрорегрессионная модель дезодорации воды на основе многослойного персептрона // Вестник КГТУ имени А.Н.Туполева. – 2015. №4 С. 16-19.
119. Пономарёв Д.С. Применение нейронных сетей в разработке модели дозирования активированного угля при очистке питьевой воды от запаха // Вестник КГТУ имени А.Н.Туполева, Казань, 2016. - №1 – С. 15-18.
120. Поспелова Д. А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта –М.: Наука, 1986. – 312 с.
121. Проскураков В.А., Шмидт Л.И. Очистка сточных вод в химической промышленности. Л., Химия, 1977. - 464 с.
122. Рашид Т. Создаем нейронную сеть на Python – СПб.: ООО «Альфа-книга», 2018. – 272 с.
123. Родина Л.И. Инвариантные и статистически слабо инвариантные множества управляемых систем: дисс. докт. физ.-мат. наук. - Владимир, 2012. - 246 с.
124. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – Москва, 2001. – 46 с.
125. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М.: Мир, 1980. – 456 с.
126. Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке М ИНПРОРЕС, 1995. - 228 с.

127. Славинская Г.В., Ковалева О.В. Использование активных углей сорбции ПАВ природного происхождения // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. Т.8. Вып.4. С. 626-635.
128. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. - 168 с.
129. Смирнов А.Д., Миркис В.И., Кантор Л.И. Углевание воды при экстраординарных загрязнениях водоисточника – р. Уфы // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 5, ч.2. С. 21-23.
130. Смирнов А.Д. Тестовые испытания и разработка рекомендаций по модернизации технологической схемы очистных сооружений станции водоподготовки «Пруд-Ижевск» для обеспечения качества воды в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01: Отчет о НИР (Заключ.)/ ЗАО «ДАР/ВОДГЕО»; Руководитель А.Д. Смирнов. М., 2005. - 103 с.
131. СНиП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Москва, 1986. – 164 с.
132. Соколов Е. Н., Вайткявичус Г. Г. Нейроинтеллект от нейрона к нейрокомпьютеру -М Наука, 1990. – 273 с.
133. Сорбционные методы в процессах очистки воды // Водоочистка. 2009. № 4. С. 23-28.
134. Сотник С. Курс лекций по предмету «Основы проектирования систем с искусственным интеллектом» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [//http //www neuropower de/rus/books/index html](http://www.neuropower.de/rus/books/index.html).
135. Н. М. Страхова, З. Н. Кудрякова, Н. О. Пирогов, Н. К. Куцева Определение органических соединений, придающих запах воде, методом газовой хроматографии с масс-селективным детектированием «Заводская лаборатория . Диагностика материалов» №7. 2006. Том 72. С. 3-6.
136. Тарнопольская М.Г., Ковалева И.Б. Применение сорбента МИУ-С в водоснабжении // Водоснабжение и санитарная техника. 2002. № 7. С. 21-23.
137. Тененев В.А., Якимович Б.А., Сенилов М.А., Паклин Н.Б. Интеллектуальные системы интерпретации данных геофизических исследований скважин / Искусственный интеллект: Донецк, Наука і освіта, 2002. – № 3. – С. 439-447.

138. Технологические отчеты водопроводного узла № 2, 2002-2016г / ВКХ СПВ «Пруд-Ижевск»; Руководитель Е.А. Ткачук. Ижевск, 2014. – 50 с.
139. Технологический паспорт СПВ «Пруд-Ижевск» ВУ № 1,2,3 / СПВ «Пруд-Ижевск». Руководитель Е.А. Ткачук. Ижевск, 2005. – 46 с.
140. Трусов А.В., Трусов В.А. Система информационно-аналитической поддержки научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса / Информационные ресурсы России. 2017. №3. С. 2-5.
141. В.Х. Федотов Нейронные сети в MS Excel: Метод. указания к практ. занятиям и лаб. работам / Сост. В. Х. Федотов; Чуваш. ун-т. Чебоксары, 2004. - 72 с.
142. Фрог Б. Н., Левченко А. П. Водоподготовка: Учебн. пособие для вузов. М. : Издательство МГУ, 1996. - 680 с.
143. Филенко О.Ф. Анализ условий формирования в природной и питьевой воде запахов биологического происхождения: Отчет о НИР (Заключ.) / Международный биотехнологический центр МГУ. - Москва, 2002. - 43 с.
144. Хехт-Нильсен Р. Нейрокомпьютинг история, состояние, перспективы// Открытые системы. 1998. №4 С. 3-5.
145. Храменков С.В. Новые технологии в практике водоснабжения и водоотведения г. Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. 2005. № 10. С. 2-6.
146. Храменков С.В. Сорбционная очистка воды для питьевого водоснабжения Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. 2000. № 7. С. 5-8.
147. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение – М.: Мир, 1990. – 396 с.
148. Технология подготовки питьевой воды. Основные проектные решения для станции производительностью 300 000 м<sup>3</sup>/сут / Разраб. ЗАО «НПО ЭКОХИМ»; Руководитель Цако Лайош. Екатеринбург, 2005. - 13 с.
149. Способ определения экологического состояния пресноводных водоемов А.с. 2050128 RU, G01N 33/18, A01K 61/00. / Цветкова Л. И., Пономарева В. Н., Копина Г. И. Оpubл. 20.12. 1995.
150. Чувилин В.Н. Кирсанов А.А., Стрелков А.К., Смирнов А.Д., Быкова П.Г. Повышение барьерной роли водопроводных очистных сооружений г. Самары // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 9, ч.2. С. 9-13.

151. Юран С.И. Методы и средства автоматизированного контроля оптической плотности биологических тканей при изменении их кровенаполнения в условиях действия артефактов: дисс. докт. техн. наук. - Ижевск, 2008. - 439 с.
152. Яковлев С.В., Карелин Я.А., Жуков А.И., Колобанов С.К. Канализация: Учебник для вузов. Изд. 5-е.М.: Стройиздат, 1975. - 632 с.
153. Koch R. The 80/20 Principle : The Secret of Achieving More with Less. – New York: Doubleday, 1998. – 288 p.
154. Pearson K. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space // Philosophical Magazine (London, UK).- 1901, № 2 (11), p. 559–572.
155. Удмуртский филиал ПАО «Т Плюс» [электронный ресурс] URL: <http://udm.esplus.ru/tariffs/> дата обращения 21.03.2018



**ПРИЛОЖЕНИЯ**

Таблица А.1. Данные сформированные на основе показателей исходной воды за каждый теплый период месяца (когда применялся активированный уголь) в период с 2002 по 2012 годы

№	Органо- лептиче- ские свойства	Темпе- ратура воды	Темпе- ратура ОС	Феноль- ный ин- декс	Хло- риды	БПК	Кон- центра- ция сине- зеленых	Мут- ность	Цвет- ность
1	1	7,5	12,2	0,0005	15,37	3,2	2,173	1,42	27
2	2	18,6	18,9	0,0005	16,6	3,5	4,5	3,5	29
3	2	22,1	23,5	0,0005	16,6	4,1	57,5	4,2	31
4	3	20,1	21,6	0,0005	16,6	4,1	58,3	3,9	32
5	3	16,5	15,2	0,0005	16,6	4,5	61,2	3,8	32
6	2	6,1	6,5	0,00051	16,6	3,6	4,17	2,5	27
7	1	12	13,3	0,0009	15,6	3,7	3,6	2,9	28
8	1	19,5	20,3	0,0009	15,7	4,26	45,84	3,7	30
9	2	22,4	23,2	0,0009	15,7	4,26	48,5	4,5	29
10	2	20,8	21,9	0,0009	15,6	4,29	103,32	4,8	32
11	3	14,2	15,3	0,0009	15,6	3,9	14,9	3,03	29
12	1	12	17,69	0,00107	16,4	3,12	30,2	2,1	30
13	1	20,2	21,65	0,00107	16,4	3,3	32,94	2,9	32
14	2	22,4	24,01	0,00107	16,3	4,1	56,15	3,2	42
15	3	20,8	20,4	0,00107	16,6	4,6	132,44	3,9	45
16	3	14,2	13,1	0,00107	16,4	2,9	21,2	4,8	29
17	1	10,7	13,3	0,00091	13,1	2,02	3,2	2,9	28
18	2	20	20,8	0,00091	13,1	3,1	56,7	3,5	37
19	2	19,8	22,7	0,00091	13,2	3,5	87,08	3,2	35
20	2	18	19,4	0,00091	13,1	3,9	164,3	5,9	39
21	2	16,3	18,3	0,00091	13,1	4,1	232	6	43,7
22	1	2	3	0,00091	13,2	4,5	345	6,1	41,2
23	1	5,6	14,75	0,00061	14	1,9	3,9	5,5	27

№	Органо- лептиче- ские свойства	Темпе- ратура воды	Темпе- ратура ОС	Феноль- ный ин- декс	Хло- риды	БПК	Концен- трация сине- зеленых	Мут- ность	Цвет- ность
24	1	17,1	18,2	0,00061	14,2	2,1	47,58	6,4	32,6
25	2	21,1	22,5	0,00061	14,5	3,5	213,35	6,5	39,6
26	2	19,7	20,36	0,00061	14,3	3,6	242	6,5	41,1
27	3	15,5	17,20	0,00061	14,3	3,9	679,82	6,9	47,1
28	2	5	5,45	0,00061	14,2	4,6	897,2	7,1	49,3
29	1	11,4	12,4	0,25	12,3	2,18	2,5	2,6	24
30	2	15,1	16,7	0,25	12,2	2,3	72,1	3,1	34,1
31	2	21,7	22,6	0,25	12,3	3,1	289,2	5,4	51,1
32	2	19,3	19,7	0,25	12,5	3,6	324,12	5,5	54,2
33	3	13,5	14,25	0,25	12,3	3,9	574	5,9	57,1
34	2	7,2	7,35	0,25	12,5	3	859	6	59,6
35	1	2,8	3,5	0,0005	12,1	0,5	0,292	1,5	21,2
36	1	10	14,6	0,0005	12,2	3,28	11,203	2,1	26,3
37	1	19,7	19,9	0,0005	12,3	2,49	88,08	2,9	42,1
38	2	20	21,2	0,0005	12,2	2,73	173,3	3,6	45,6
39	2	19	20,5	0,0005	12,1	1,41	242	5,5	49,1
40	3	17,3	18,5	0,001	12,1	1,79	355,88	5,7	56,1
41	2	4	5,4	0,0005	12	3,38	320,57	5,7	52,3
42	1	3,4	8,6	0,00072	17,1	2,77	1,63	1,72	21,1
43	2	11,6	19,5	0,0005	9,25	2,9	57,58	3,8	25,2
44	2	19	22,4	0,0005	11	3,5	273,35	5,8	29,3
45	2	23,1	27,3	0,0005	10,7	3,9	342	5,9	35,2
46	3	22	23,24	0,0005	12,3	4,5	801,82	6,5	37,2
47	3	16,4	17,65	0,00075	14,4	5,5	1281,1	7,2	42,1
48	2	4,2	4,38	0,0005	14	5	765,2	7	35,1
49	1	2,3	5,2	0,00053	19	1,96	1,85	1,74	37,5
50	2	10	16,69	0,00087	12,6	2,71	116,25	5,8	57,1
51	3	17,8	19,7	0,00099	9,5	2,89	228	5,8	54,3

№	Органо- лептиче- ские свойства	Темпе- ратура воды	Темпе- ратура ОС	Феноль- ный ин- декс	Хло- риды	БПК	Кон- центра- ция сине- зеленых	Мут- ност ь	Цве- тнос- ть
52	4	22,1	24,45	0,00144	10,5	6,18	192,73	4,7	49,9
53	3	20	20,85	0,00134	10,5	5,07	874	8,2	50,8
54	2	13,7	14,5	0,00158	8,9	5,61	1059	4,7	56,1
55	2	6	6,7	0,0015	10	5,1	420,57	4,6	52,1
56	1	2,8	11,06	0,00097	15,7	2,06	2,94	1,84	40,7
57	1	12	17,69	0,00103	8,7	1,33	195,18	4,3	60,6
58	1	19,5	21,65	0,0005	11,9	3,69	156,64	3,8	51,8
59	3	22,4	24,01	0,0005	13,8	5,42	262,37	3,8	53,5
60	3	20,8	20,9	0,00076	12	5,26	584,5	5,7	44
61	3	14,2	15,5	0,00066	12,7	8	576,2	7,1	36,4
62	2	6,5	6,55	0,0005	12	8,1	321	6,9	39,3

Таблица А.2. Данные сформированные на основе показателей исходной воды за каждый теплый период месяца (когда применялся активированный уголь) в период с 2002 по 2012 годы в безразмерном виде

№	Органолептические свойства исходной воды	Температура воды	Температура ОС	Фенольный индекс	Хлориды	БПК	Концентрация синезеленых	Мутность	Цветность
1	0,000	0,261	0,379	0,000	0,648	0,355	0,001	0,000	0,149
2	0,333	0,787	0,654	0,000	0,767	0,395	0,003	0,307	0,200
3	0,333	0,953	0,844	0,000	0,767	0,474	0,045	0,410	0,251
4	0,667	0,858	0,765	0,000	0,767	0,474	0,045	0,366	0,276
5	0,667	0,687	0,502	0,000	0,767	0,526	0,048	0,351	0,276
6	0,333	0,194	0,144	0,000	0,767	0,408	0,003	0,159	0,149
7	0,000	0,474	0,424	0,002	0,670	0,421	0,003	0,218	0,175
8	0,000	0,829	0,712	0,002	0,680	0,495	0,036	0,336	0,225
9	0,333	0,967	0,831	0,002	0,680	0,495	0,038	0,454	0,200
10	0,333	0,891	0,778	0,002	0,670	0,499	0,080	0,499	0,276
11	0,667	0,578	0,506	0,002	0,670	0,447	0,011	0,237	0,200
12	0,000	0,474	0,605	0,002	0,748	0,345	0,023	0,100	0,225
13	0,000	0,863	0,767	0,002	0,748	0,368	0,025	0,218	0,276
14	0,333	0,967	0,865	0,002	0,738	0,474	0,044	0,263	0,529
15	0,667	0,891	0,716	0,002	0,767	0,539	0,103	0,366	0,605
16	0,667	0,578	0,416	0,002	0,748	0,316	0,016	0,499	0,200
17	0,000	0,412	0,424	0,002	0,427	0,200	0,002	0,218	0,175
18	0,333	0,853	0,733	0,002	0,427	0,342	0,044	0,307	0,403
19	0,333	0,844	0,811	0,002	0,437	0,395	0,068	0,263	0,352
20	0,333	0,758	0,675	0,002	0,427	0,447	0,128	0,661	0,453
21	0,333	0,678	0,630	0,002	0,427	0,474	0,181	0,676	0,572
22	0,000	0,000	0,000	0,002	0,437	0,526	0,269	0,690	0,509
23	0,000	0,171	0,484	0,000	0,515	0,184	0,003	0,602	0,149
24	0,000	0,716	0,626	0,000	0,534	0,211	0,037	0,735	0,291
25	0,333	0,905	0,802	0,000	0,563	0,395	0,166	0,749	0,468
26	0,333	0,839	0,714	0,000	0,544	0,408	0,189	0,749	0,506
27	0,667	0,640	0,584	0,000	0,544	0,447	0,531	0,808	0,658
28	0,333	0,142	0,101	0,000	0,534	0,539	0,700	0,838	0,714
29	0,000	0,445	0,387	1,000	0,350	0,221	0,002	0,174	0,073
30	0,333	0,621	0,564	1,000	0,340	0,237	0,056	0,248	0,329
31	0,333	0,934	0,807	1,000	0,350	0,342	0,226	0,587	0,759
32	0,333	0,820	0,687	1,000	0,369	0,408	0,253	0,602	0,838
33	0,667	0,545	0,463	1,000	0,350	0,447	0,448	0,661	0,911

№	Органолептические свойства исходной воды	Температура воды	Температура ОС	Фенольный индекс	Хлориды	БПК	Концентрация синезеленых	Мутность	Цветность
34	0,333	0,246	0,179	1,000	0,369	0,329	0,670	0,676	0,975
35	0,000	0,038	0,021	0,000	0,330	0,000	0,000	0,012	0,003
36	0,000	0,379	0,477	0,000	0,340	0,366	0,009	0,100	0,132
37	0,000	0,839	0,695	0,000	0,350	0,262	0,069	0,218	0,532
38	0,333	0,853	0,749	0,000	0,340	0,293	0,135	0,322	0,620
39	0,333	0,806	0,720	0,000	0,330	0,120	0,189	0,602	0,709
40	0,667	0,725	0,638	0,002	0,330	0,170	0,278	0,631	0,886
41	0,333	0,095	0,099	0,000	0,320	0,379	0,250	0,631	0,790
42	0,000	0,066	0,230	0,001	0,816	0,299	0,001	0,044	0,000
43	0,333	0,455	0,679	0,000	0,053	0,316	0,045	0,351	0,104
44	0,333	0,806	0,798	0,000	0,223	0,395	0,213	0,646	0,208
45	0,333	1,000	1,000	0,000	0,194	0,447	0,267	0,661	0,357
46	0,667	0,948	0,833	0,000	0,350	0,526	0,626	0,749	0,408
47	0,667	0,682	0,603	0,001	0,553	0,658	1,000	0,853	0,532
48	0,333	0,104	0,057	0,000	0,515	0,592	0,597	0,823	0,354
49	0,000	0,014	0,091	0,000	1,000	0,192	0,001	0,047	0,415
50	0,333	0,379	0,563	0,001	0,379	0,291	0,091	0,646	0,911
51	0,667	0,749	0,687	0,002	0,078	0,314	0,178	0,646	0,841
52	1,000	0,953	0,883	0,004	0,175	0,747	0,150	0,484	0,729
53	0,667	0,853	0,735	0,003	0,175	0,601	0,682	1,000	0,752
54	0,333	0,555	0,473	0,004	0,019	0,672	0,827	0,484	0,886
55	0,333	0,190	0,152	0,004	0,126	0,605	0,328	0,469	0,785
56	0,000	0,038	0,332	0,002	0,680	0,205	0,002	0,062	0,496
57	0,000	0,474	0,605	0,002	0,000	0,109	0,152	0,425	1,000
58	0,000	0,829	0,767	0,000	0,311	0,420	0,122	0,351	0,777
59	0,667	0,967	0,865	0,000	0,495	0,647	0,205	0,351	0,820
60	0,667	0,891	0,737	0,001	0,320	0,626	0,456	0,631	0,580
61	0,667	0,578	0,514	0,001	0,388	0,987	0,450	0,838	0,387
62	0,333	0,213	0,146	0,000	0,320	1,000	0,250	0,808	0,461

Таблица А.3. Данные сформированные на основе показателей исходной воды за каждый теплый период месяца (когда применялся активированный уголь) в период с 2002 по 2012 годы в главных компонентах

P1	P2	P3	P4
0,139625	0,483522	-0,30533	0,355641
0,612187	0,983635	-0,33366	0,480294
0,804839	1,160571	-0,31486	0,469674
0,891297	1,105032	-0,39804	0,56571
0,802521	0,83957	-0,49933	0,598051
0,266975	0,343086	-0,52229	0,530139
0,329408	0,603636	-0,32489	0,365928
0,591599	0,958296	-0,26276	0,355208
0,835539	1,149229	-0,30843	0,434487
0,874931	1,032781	-0,3123	0,421468
0,68096	0,80291	-0,4383	0,545404
0,295019	0,733747	-0,25599	0,375744
0,513068	1,039301	-0,17962	0,363889
0,859693	1,145174	-0,19133	0,429512
1,060231	1,00994	-0,33822	0,546641
0,716502	0,720808	-0,44579	0,551816
0,308726	0,52247	-0,11349	0,194934
0,818497	0,953861	-0,07673	0,264931
0,817875	1,007108	-0,1091	0,282014
1,029931	0,767176	-0,18592	0,258366
1,081618	0,647531	-0,1892	0,250615
0,666538	-0,21709	-0,40076	0,223933
0,390769	0,376516	-0,2114	0,195363
0,695747	0,736214	-0,1033	0,191229
1,101567	0,93277	-0,17971	0,303458
1,099105	0,819492	-0,1951	0,298555
1,398019	0,51669	-0,33193	0,392968
1,165624	-0,20516	-0,47575	0,342426
0,340296	0,373557	0,441049	0,941515
0,722535	0,556062	0,495762	0,983314
1,274962	0,703372	0,609808	0,922094
1,283764	0,537211	0,54839	0,942751
1,45691	0,189517	0,382455	1,03836
1,260027	-0,29659	0,401957	0,95159
-0,07252	0,097242	-0,13089	0,169579
0,323468	0,54184	-0,16181	0,187452
0,683546	0,840862	0,103432	0,110489
0,957716	0,873599	0,046027	0,181681

P1	P2	P3	P4
1,067041	0,748974	0,123786	0,114689
1,300753	0,628551	0,047451	0,201421
0,906266	-0,11032	-0,21185	0,186259
-0,04552	0,330146	-0,45349	0,456439
0,705937	0,660705	-0,07034	0,089087
1,044875	0,856423	-0,12849	0,165934
1,249783	1,043389	-0,03803	0,129215
1,531236	0,845017	-0,28577	0,333425
1,649429	0,418042	-0,53521	0,470105
0,983262	-0,15366	-0,61099	0,388543
-0,01754	0,167419	-0,37788	0,490323
1,019055	0,387614	-0,00444	0,13989
1,383634	0,661804	0,085624	0,094696
1,604995	1,023238	-0,20113	0,333832
1,826497	0,566741	-0,2038	0,205875
1,500762	0,152818	-0,12045	0,089578
1,029917	-0,06029	-0,21774	0,145681
0,171757	0,25071	-0,17384	0,291618
0,921596	0,347914	0,384619	-0,17605
0,934175	0,784304	0,10777	0,073394
1,340888	1,02148	-0,18355	0,3891
1,477649	0,783872	-0,26648	0,326026
1,465258	0,473736	-0,65415	0,450512
1,107416	0,018902	-0,63826	0,334807



## Приложение Б

Таблица Б.1. Данные сформированные на основе показателей чистой воды когда применялся активированный уголь в период с 2002 по 2012 годы

№	Органолептические свойства	Геосмин	Хлороформ	Хлориды	Фенольный индекс
1	1	0,00048	0,091	15,9	0,005
2	1	0,00048	0,091	16,9	0,005
3	2	0,00048	0,092	17,2	0,005
4	2	0,00048	0,092	17,2	0,005
5	2	0,00048	0,092	17,2	0,005
6	1	0,00048	0,091	17,2	0,005
7	1	0,0001	0,087	15,8	0,0005
8	1	0,0001	0,086	15,9	0,0005
9	2	0,0001	0,085	15,8	0,0005
10	2	0,0001	0,086	15,8	0,0005
11	2	0,0001	0,087	15,8	0,0005
12	1	0,000068	0,066	18,6	0,00054
13	1	0,000068	0,065	18,6	0,00054
14	2	0,000068	0,065	18,5	0,00054
15	2	0,000068	0,064	18,8	0,00054
16	2	0,000068	0,063	18,6	0,00054
17	1	0,00067	0,045	16,6	0,00051
18	2	0,00067	0,042	16,5	0,00051
19	2	0,00067	0,044	16,7	0,00051
20	2	0,00067	0,044	16,5	0,00051
21	2	0,00067	0,045	16,6	0,00051
22	1	0,00067	0,045	16,7	0,00051
23	1	0,000054	0,033	17,6	0,0005
24	1	0,000054	0,032	17,8	0,0005
25	1	0,000054	0,031	18	0,0005

## Продолжение таблицы Б.1

№	Органолептические свойства	Геосмин	Хлороформ	Хлориды	Фенольный индекс
26	2	0,000055	0,03	17,9	0,0005
27	2	0,000055	0,033	17,9	0,0005
28	1	0,000054	0,034	17,8	0,0005
29	1	0,000052	0,048	17	0,0005
30	1	0,000052	0,046	16,9	0,0005
31	1	0,000052	0,044	17,1	0,0005
32	1	0,000052	0,044	17,2	0,0005
33	2	0,000055	0,046	17,1	0,0005
34	1	0,000052	0,048	17,3	0,0005
35	1	0,000031	0,0211	15,9	0,0005
36	1	0,000031	0,043	16	0,0005
37	1	0,000031	0,0223	16,1	0,0005
38	1	0,000031	0,0149	16	0,0005
39	1	0,000031	0,0154	15,9	0,0005
40	2	0,000031	0,03	15,9	0,001
41	1	0,000031	0,0143	15,8	0,0005
2	1	0,000052	0,027	24,7	0,0005
43	1	0,000052	0,022	15,6	0,0005
44	2	0,000054	0,0125	16,4	0,0005
45	2	0,000054	0,0158	16,1	0,0005
46	2	0,000054	0,016	16,1	0,0005
47	2	0,000054	0,0112	22,7	0,0005
48		0,000013	0,011	20,6	0,0005
49	1	0,000029	0,027	23,8	0,0005
50	2	0,000029	0,022	21,9	0,0005
51	1	0,000028	0,0145	12,7	0,0005
52	2	0,000028	0,0149	15,3	0,0005
53	1	0,000028	0,015	15,3	0,0005
54	1	0,000028	0,014	14,7	0,0005

Продолжение таблицы Б.1

№	Органолептические свойства	Геосмин	Хлороформ	Хлориды	Фенольный индекс
55	1	0,000028	0,014	14	0,0005
56	1	0,00001	0,016	22,2	0,0005
57	1	0,00001	0,0249	13,8	0,0005
58	1	0,00001	0,02	14,3	0,0005
59	2	0,000029	0,0231	17,8	0,0005
60	2	0,000029	0,02	15,8	0,0005
61	2	0,000029	0,0152	16,7	0,0005
62	2	0,000029	0,015	16	0,0005

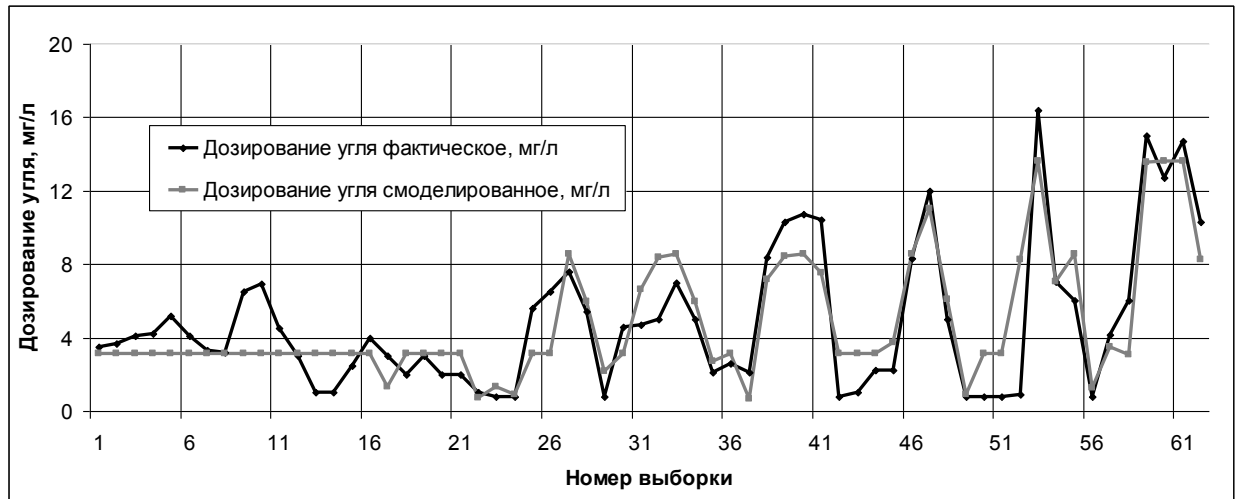


Рисунок В.1 – Обучение ИНС по фактическим значениям для параметра дозирование активированного угля

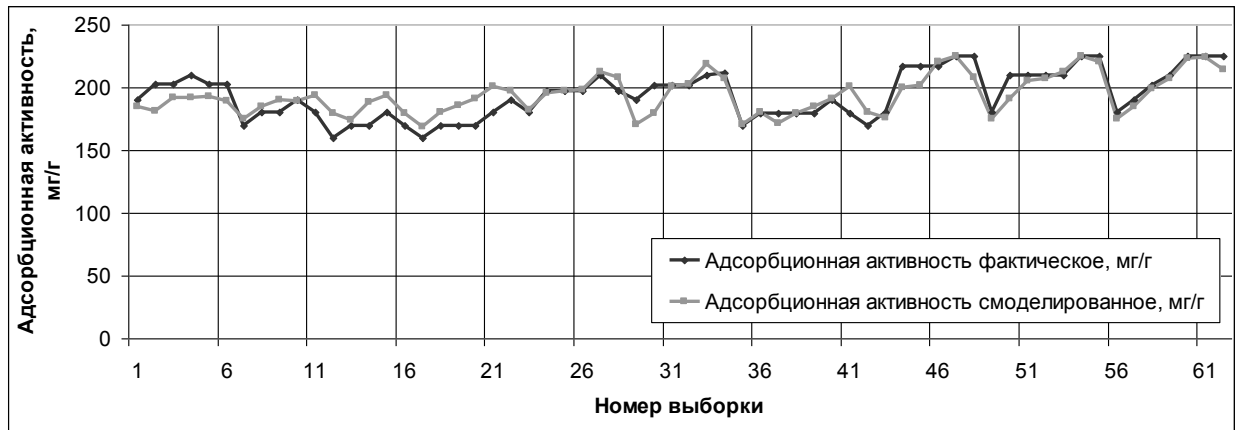


Рисунок В.2 – Рисунок 14 – Обучение ИНС по фактическим значениям для параметра адсорбционная активность активированного угля

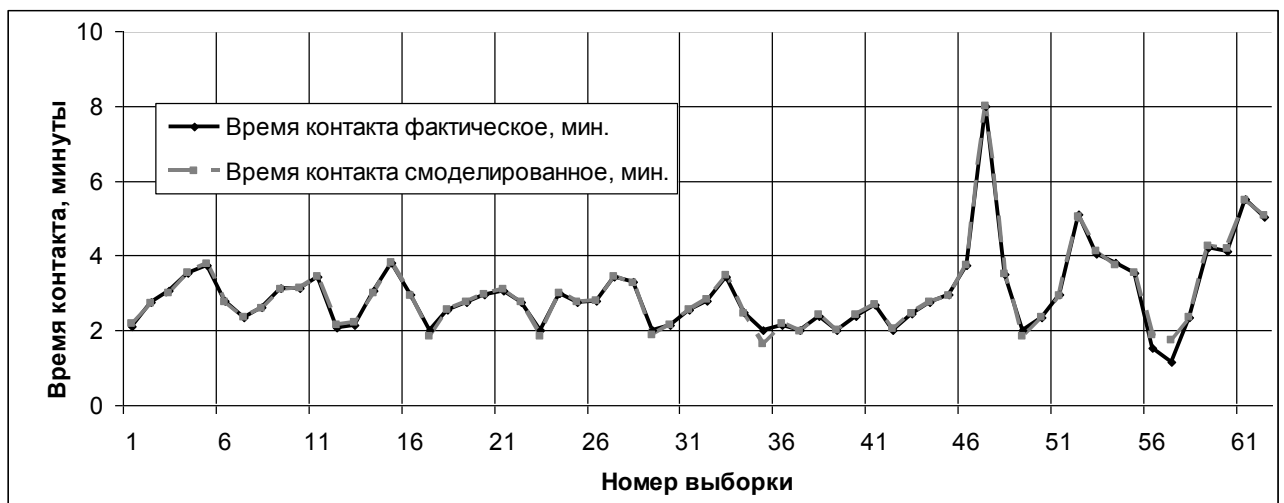


Рисунок В.3 – Обучение ИНС по фактическим значениям для параметра время контакта активированного угля с водой

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2559561

## СПОСОБ ОЦЕНКИ РИСКА РАЗМНОЖЕНИЯ СИНЕ-ЗЕЛЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ В ВОДОЕМЕ

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014113368

Приоритет изобретения 04 апреля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 14 июля 2015 г.

Срок действия патента истекает 04 апреля 2034 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Автор(ы): *Пономарёв Дмитрий Сергеевич (RU), Исаков  
Виталий Германович (RU), Пономарёв Сергей Борисович  
(RU), Гаврилов Станислав Александрович (RU)*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2014662091**

**Программа для оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в пресноводном водоеме**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (RU)*

Авторы: *Пономарёв Дмитрий Сергеевич (RU), Исаков Виталий Германович (RU), Пономарёва Анна Сергеевна (RU)*

Заявка № **2014619761**

Дата поступления **30 сентября 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 ноября 2014 г.**

*Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Л.Л. Курий*





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015619352

Программа для расчета расхода активированного угля  
марки ОУ-В для очистки воды от геосмина

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (RU)*

Авторы: *Пономарёв Дмитрий Сергеевич (RU), Исаков Виталий Германович (RU), Пономарёва Анна Сергеевна (RU)*

Заявка № 2015616177

Дата поступления 07 июля 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 сентября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015661214

Программа для расчета концентрации хлоридов в  
питьевой воде

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (RU)*

Авторы: *Пономарёв Дмитрий Сергеевич (RU),  
Исаков Виталий Германович (RU)*

Заявка № 2015618338

Дата поступления 11 сентября 2015 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 21 октября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Курий





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015661548

Программа для расчета концентрации хлороформа в  
питьевой воде

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (RU)*

Авторы: *Пономарёв Дмитрий Сергеевич (RU),  
Исаков Виталий Германович (RU)*



Заявка № 2015618304

Дата поступления 11 сентября 2015 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 29 октября 2015 г.

Заместитель руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Курий