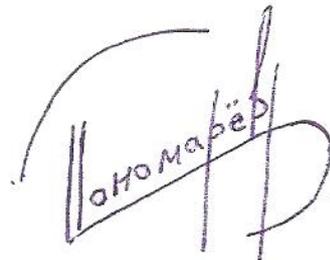


УДК 303.732.4; 004.942; 004.67

На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Пономарёв' (Ponomarev) with a stylized flourish below it.

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т.Калашникова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Исаков Виталий Германович**, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Юран Сергей Иосифович**, ФГБОУ ВО «Ижевская сельскохозяйственная академия»

кандидат технических наук, **Трусов Владимир Александрович**, ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Министерства энергетики Российской Федерации (Пермский филиал – ФГБУ «РЭА» Минэнерго России)

Ведущая организация: Федеральное казённое образовательное учреждение высшего образования «Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний»

Защита состоится «18» апреля 2019 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, д. 2, 5 корпус.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 20__ г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.065.06
кандидат технических наук, доцент

В.Н. Сяктерев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На сегодняшний день на фоне увеличивающегося негативного 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 очистки 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 дорогостоящим 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 Алексеева 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. и др. 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.). Вопросами 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. 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, принятия 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».

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

Предметом исследования является интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления процессом дезодорации предварительно очищенной воды.

Целью диссертационного исследования является разработка модели управления технологическим процессом дезодорации поверхностных вод на городских очистных сооружениях в условиях эвтрофированных 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.
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, позволяющая 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.
4. 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 в питьевой воде, исходя из качества исходной воды.
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.

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 модель и алгоритм управления технологического процесса 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 [1-5] опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК; 1 патент на изобретение [6]; 1 статья в сборнике конференции, включенном в базу *Web of Science* [24]; 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [7-10]. В статье [4] соискателю принадлежит разработка нейрорегрессионной модели дезодорации воды на основе многослойного персептрона. В статьях [2, 3] соискателю принадлежит разработанная регрессионная модель значений концентрации геосмина в питьевой воде. В работах [6-12] соискателю принадлежат разработанная модель оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме и модели значений концентраций одорирующих веществ в питьевой воде. Остальные результаты в работах по теме диссертации 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 1st 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 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 [1-5], непосредственном участии в разработке изобретения [6] и программ для ЭВМ [7-10] 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость результатов. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены проблемы дезодорации воды в системе питьевого водоснабжения, проанализированы и выявлены основные причины ухудшения ароматических свойств питьевой воды. Анализ методов дезодорации в системе питьевого водоснабжения показал, что одним из перспективных решений проблемы является применение сорбентов, таких как активированный уголь. Основными преимуществами сорбента являются: дешевизна, возможность сезонного применения, высокая адсорбционная активность, возможность применения в любом узле технологической схемы, кроме того, не нужно реконструировать существующие сооружения водоочистки. Технологическая схема системы водоочистки рассматриваемого предприятия представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Технологическая схема на СПВ «Пруд-Ижевск»

В работе система водоснабжения была рассмотрена как сложная система, которая имеет внутреннюю структуру, взаимодействие элементов, возможность разделения на подсистемы и на которую имеется воздействие внешних факторов со стороны окружающей среды (рисунок 2).

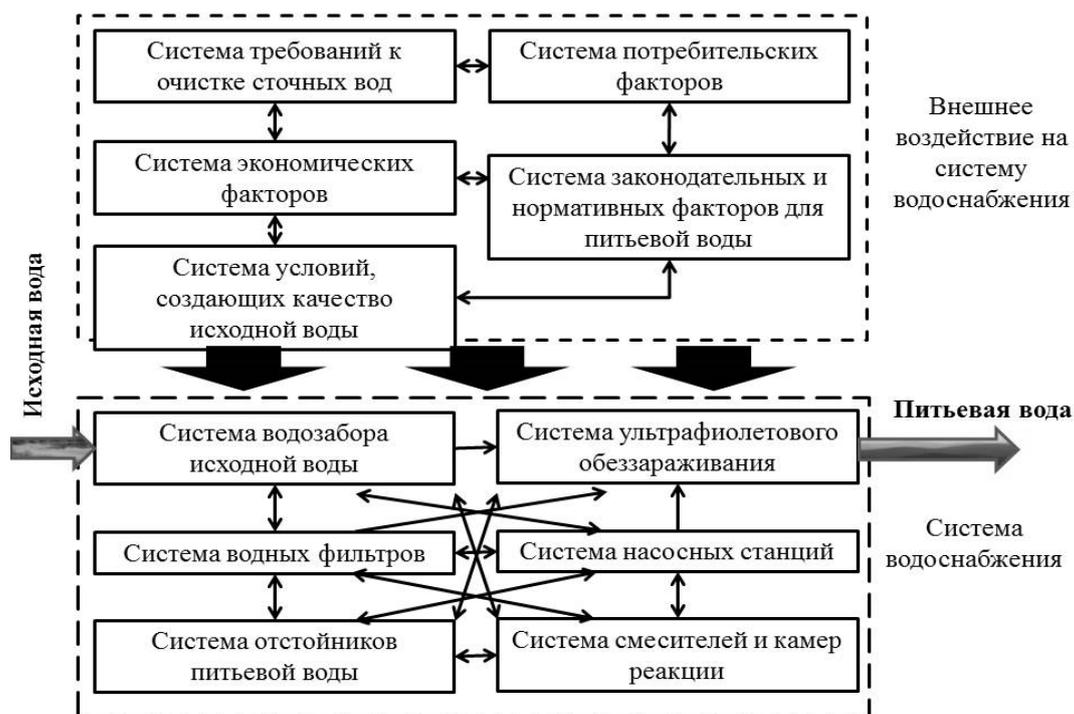


Рисунок 2. Система водоснабжения. Внутреннее взаимодействие и внешнее воздействие

Процессы дезодорации воды порошкообразным активированным углем (ПАУ) являются малоизученными: отсутствуют рекомендации по выбору марки ПАУ, его оптимального дозирования и времени контакта с водой. Были сформированы условия для разработки модели (рисунок 3).

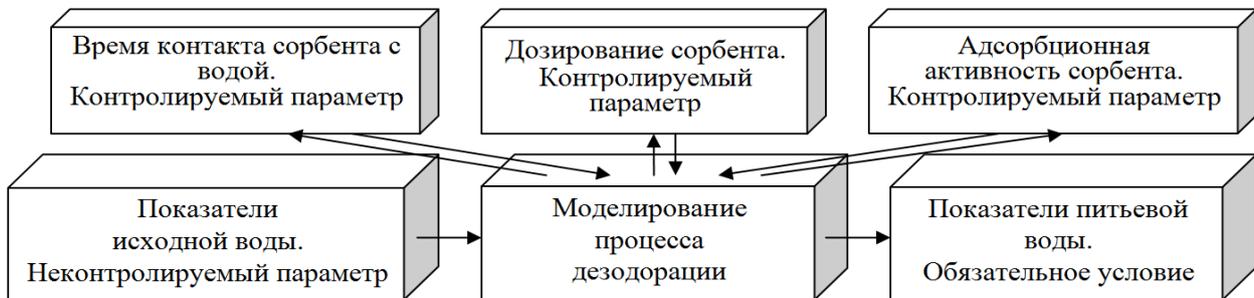


Рисунок 3 – Структурная схема определения условий разработки модели параметров дезодорации питьевой воды в системе питьевого водоснабжения

В разработке модели особый интерес представляет применение искусственной нейронной сети (ИНС): она позволяет выявить нелинейные зависимости и тем самым более точно описывать рассматриваемые процессы. Кроме того, ИНС обучается на всей выборке, не фрагментируя её, что повышает точность результатов.

Во второй главе решается задача выявления факторов, определяющих уровень и динамику процесса дезодорации питьевой воды в системе питьевого водоснабжения. Для оценки эффективности технологической схемы системы водоснабжения предложен метод на основе корреляционного анализа данных.

Были выбраны основные параметры исходной воды, 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 – органолептический показатель воды, баллы; X_2 – температура исходной воды, $С^0$; X_3 – температура окружающей среды, $С^0$; 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 устранения мультиколлинеарности между параметрами X_1 – X_9 был применен метод главных компонент (МГК). Приведение значений случайных переменных к безразмерному виду проводилось по формуле (1), получены значения случайных переменных в интервале $[0;1]$.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}. \quad (1)$$

Была рассчитана матрица коэффициентов корреляции (R) для показателей исходной воды (X_n) (таблица 1).

Таблица 1 – Матрица коэффициентов корреляции.

Параметры	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_1	1	0,436	0,320	0,007	-0,137	0,511	0,432	0,491	0,359
X_2	0,436	1	0,942	0,001	-0,059	0,185	-0,003	0,193	0,138
X_3	0,320	0,942	1	-0,059	-0,100	0,068	-0,103	0,109	0,092
X_4	0,007	0,001	-0,059	1	-0,169	-0,153	0,115	0,033	0,222
X_5	-0,137	-0,059	-0,100	-0,169	1	-0,048	-0,379	-0,373	-0,491
X_6	0,511	0,185	0,068	-0,153	-0,048	1	0,479	0,447	0,149
X_7	0,433	-0,003	-0,103	0,115	-0,379	0,479	1	0,701	0,529
X_8	0,491	0,193	0,109	0,033	-0,373	0,447	0,701	1	0,487
X_9	0,359	0,138	0,092	0,222	-0,491	0,149	0,529	0,487	1

Определены собственные векторы и собственные значения матрицы R . Так как матрица R симметрическая, то был применен метод вращений Якоби для нахождения собственных векторов и собственных значений.

По правилу Парето, 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 (2),

$$y_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot x_j, \quad (2)$$

была определена матрица перехода к выбранным главным компонентам (таблица 2).

Таблица 2 - 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

Был проведен корреляционный анализ данных для главных компонент (P) и параметров питьевой воды (Z). Корреляционная зависимость была установлена для концентрации геосмина в питьевой воде, мг/дм³ (Z_2); концентрации хлороформа, мг/дм³ (Z_3); концентрации хлоридов, мг/дм³ (Z_4). Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты корреляционного анализа для 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

Был применен метод наименьших квадратов (МНК), разработаны уравнения для концентрации одорирующих веществ в питьевой воде. Для концентрации геосмина (Z_2) было разработано уравнение (3):

$$Z_2=10^{-3}(-1,8P_2^5+4,2P_2^4-2,3P_2^3-0,03P_2^2+0,2P_2+0,2) \quad (3)$$

Концентрация хлороформа (Z_3) имеет корреляционную зависимость с первой главной компонентой (P_1) (коэффициент корреляции $r= -0,6$). Были упорядочены данные согласно возрастанию главной компоненты P_1 и построены зависимости концентрации хлороформа от нее. Разработано уравнение (4).

$$Z_3=0,36P_1^6-2,05P_1^5+4,36P_1^4-4,2P_1^3+1,7P_1^2-0,2P_1+0,06 \quad (4)$$

Для концентрации хлоридов (Z_4) выявлена корреляционная зависимость с первой (P_1) и третьей (P_3) главными компонентами (коэффициенты корреляции $r=0,5$ и $r=-0,9$). Были упорядочены данные по P_1 . В данном случае МНК применялся согласно (5).

$$F(\bar{X}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - A^T X_i + b_i)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

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 необходимо найти относительно неизвестных A и $B = \{b_i\}, i = \overline{1, n}$. Разработано уравнение (6).

$$Z_4=3,917P_1-5,397P_3+8,551 \quad (6)$$

Достоверность результатов была доказана при помощи коэффициента корреляции (для геосмина $r=0,81$, хлоридов $r=0,97$, хлороформа $r=0,76$), а так же двухвыборочного t -теста с различными дисперсиями: коэффициент Стьюдента во всех трех случаях меньше значения t -критического двухстороннего (для геосмина $0,01 < 1,98$; для хлоридов $0,02 < 1,97$; для хлороформа $0,05 < 1,98$). При помощи корреляционного анализа доказана необходимость применения существующей технологической схемы предприятия в области удаления ароматических соединений, ухудшающих органолептические свойства питьевой воды. Корреляционная зависимость между параметрами исходной и питьевой воды в 86,97 % случаев отсутствует, для остальных 13,04% значений параметров питьевой воды, где имеется сильная корреляционная зависимость (коэффициенты корреляции от 0,5 до 1 составили для концентрации геосмина, хлороформа и хлоридов) разработаны модели на основе регрессионного анализа, МГК и МНК. Полученные результаты удовлетворяют установленным нормам для питьевой воды. Для содержания геосмина в питьевой воде была разработана зависимость расхода активированного угля при верхнем пределе концентрации вещества ($0,1 \cdot 10^{-6}$ мг/л) и при нижнем пределе ($0,2 \cdot 10^{-6}$ мг/л). Из полученных результатов можно сказать, что разработку модели следует производить для совокупности параметров дезодорации.

В третьей главе рассмотрена возможность и доказана актуальность применения ИНС для моделирования основных параметров процесса дезодорации в системе питьевого водоснабжения. Для распространения входящих сигналов применялась формула (7):

$$X = WI \quad (7)$$

Где W - матрица весов; I - матрица входящих сигналов; X - результирующая матрица для нейронов скрытого слоя. Обновление весовых коэффициентов в зависимости от ошибки осуществлялось по формуле (8):

$$\frac{dE}{dw_{jk}} = -(t_k - o_k) \frac{1}{1 + e^{-\sum_j w_{jk} o_j}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\sum_j w_{jk} o_j}} \right) o_j \quad (8)$$

Где t_k - фактическое значение, которое соответствует выходу ИНС (в нашем случае рассматриваются три параметра фактических значений: дозирование сорбента, адсорбционная активность, время контакта сорбента с водой), o_k - выходной сигнал (*output*) ИНС (для указанных ранее трех параметров) w_{jk} - весовые значения связей ИНС o_j - выходной сигнал скрытого

слоя, E - общая ошибка слоя. Формула (8) обусловлена применением в разрабатываемой ИНС сигмоидальной функции активации (9).

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (9)$$

Данный выбор был обоснован тем, что: функция дифференцируема на всей области, обладает свойством усиливать слабые сигналы, обладает возможностью предотвращать «переобучение» от больших значений сигналов.

В качестве входящих сигналов были выбраны параметры исходной воды ($X_1 - X_9$) из корреляционного анализа данных. В качестве исходящих сигналов были выбраны параметры дезодорации питьевой воды (Y_n): Y_1 - Дозирование ПАУ, мг/дм³; Y_2 - Адсорбционная активность ПАУ, мг/г; Y_3 - Время контакта ПАУ с дезодорируемой водой, минуты. Параметры питьевой воды (Z_n) были приняты как обязательное условие, основу которого составляет СанПиН 2.1.4.1074-01. Данные переводились в безразмерную форму вычитанием среднего и нормированием дисперсии. Для оценки значимости был использован алгоритм *Boxcounting*. Результаты определения входящих сигналов относительно исходящих представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Определение значимости входящих сигналов ИНС

Для улучшения предсказательной силы ИНС были отброшены наименее значимые входящие сигналы. Таким образом, для параметра дозирование ПАУ (Y_1) отношение среднего значения параметра нормализации и дисперсии изменилось с 2,56 до 2,83; для адсорбционной активности ПАУ (Y_2) с 3,57 до 4,84; для времени контакта ПАУ с водой (Y_3) с 3,38 до 7,35.

На основе определения значимости параметров исходной воды для каждого из основных параметров технологического процесса дезодорации, была разработана структура ИНС, по которой в дальнейшем проходило обучение (рисунки 5, 6). При разработке структуры ИНС учитывалось, что общее число связей сети (весов) должно быть в несколько раз меньше объема обучающей выборки.

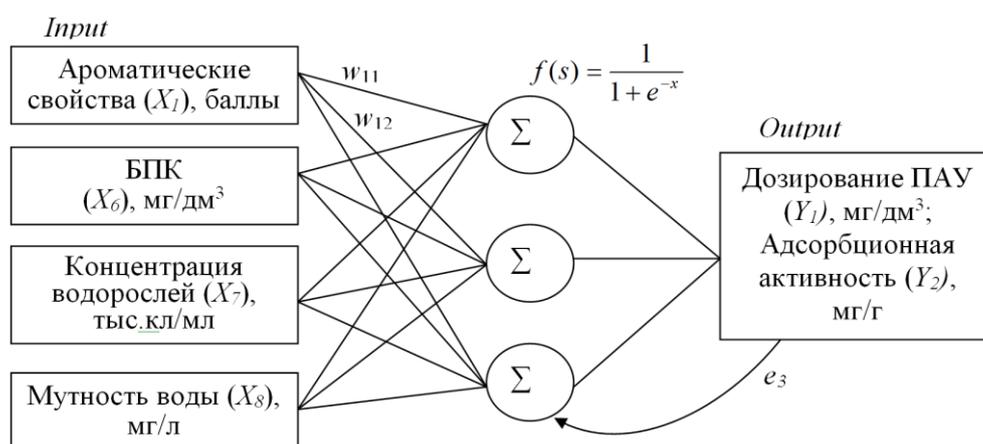


Рисунок 5 – Структура ИНС для дозирования и адсорбционной активности ПАУ

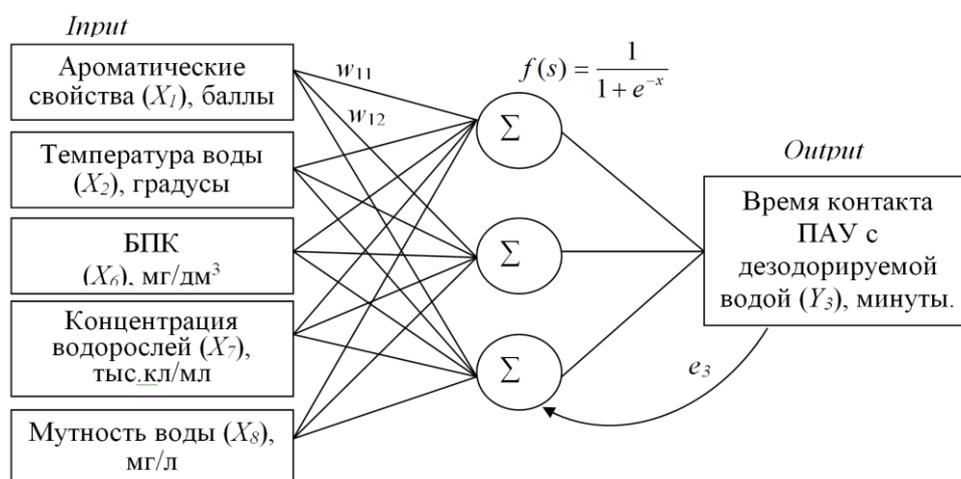


Рисунок 6 – Структура ИНС для времени контакта ПАУ с водой

Далее проводилось обучение ИНС. Для реализации процесса обучения ИНС использовался пакет *Excel Neural Package*. Изначально погрешность ИНС для параметра дозирования ПАУ составляла 0,9. После проведения обучения через 7277 эпох погрешность ИНС сократилась до 0,49. Для адсорбционной активности ПАУ начальная погрешность составляла 1,48. После проведения обучения через 6132 эпох погрешность ИНС составила 0,53. Для времени контакта с водой начальная погрешность составляла 1,08. После проведения обучения через 6157 эпох погрешность ИНС составила 0,21.

При помощи критерия Фишера было доказано, что разработанная ИНС для процесса дезодорации адекватно рассчитывает значения показателей (для дозирования ПАУ– 23,22, адсорбционной активности – 81,15, времени контакта с питьевой водой – 43,19). Из анализа данных по сорбенту на рассматриваемом предприятии с 2003 по 2012 год, было установлено, что ежегодная среднесезонная сумма остатка ПАУ составляет 10,282 тонн, в то время как остаток по результатам модели (в данном случае средняя ошибка регрессии) составляет всего лишь 15 килограмм (таблица 4).

Таблица 4 – Экономическая эффективность от применения разработанной модели на предприятии с 2003 по 2012 год

Остаток ПАУ после сезонной очистки, тонны	Остаток ПАУ после сезонной дезодорации по результатам модели, тонны	Разница между значениями остатка ПАУ после сезонной дезодорации и полученными при помощи модели, тонны	Разница на закупку ПАУ, 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

Применение разработанной модели для основных параметров дезодорации позволит сократить ежегодный остаток ПАУ после сезонной очистки воды от одорирующих веществ на 99,83 %. При средней закупочной цене ПАУ марок ОУ-А и ОУ-Б в 80 рублей за килограмм, с 2003 по 2012 год, возможно было сократить расходы на каждую сезонную закупку до 1,5 миллионов рублей.

В четвертой главе проведена проверка адекватности и возможности применения разработанной модели в качестве интеллектуальной системы поддержки принятия решений и корректировки значений основных параметров дезодорации питьевой воды на фактических данных в период с 2013 по 2014 год за каждый месяц, когда применялся ПАУ. Результаты сравнения фактических и полученных при помощи модели значений для параметров дезодорации на 2013-2014 годы приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение фактических и полученных при помощи обученной ИНС данных

№	Фактические значения			Промоделированные значения ИНС		
	Дозирование ПАУ	Адсорбционная активность	Время контакта	Дозирование ПАУ	Адсорбционная 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 разработанных таблиц были составлены графики сравнения фактических и полученных при помощи модели значений для параметров дозирования ПАУ, адсорбционной активности, времени контакта ПАУ с водой (рисунки 7-9).

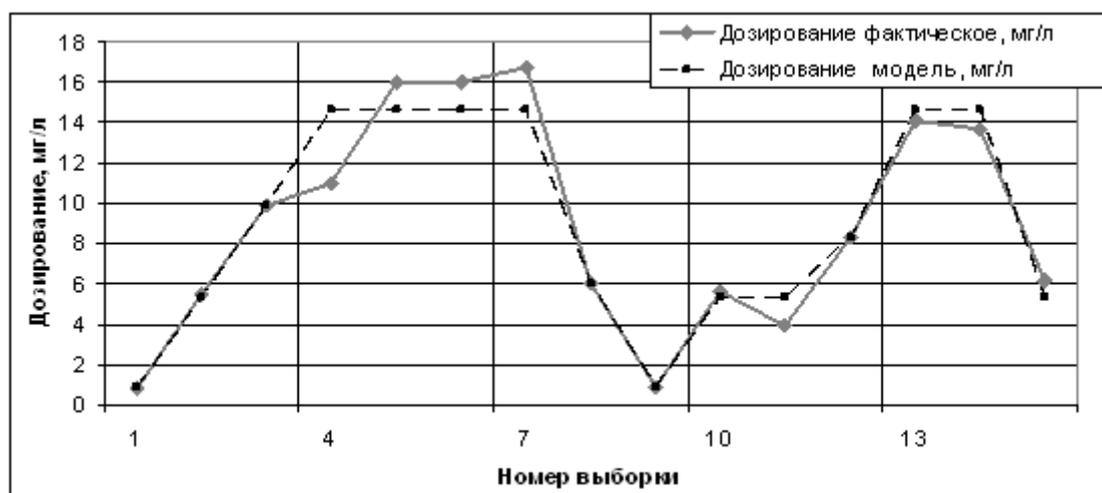


Рисунок 7 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра дозирования ПАУ

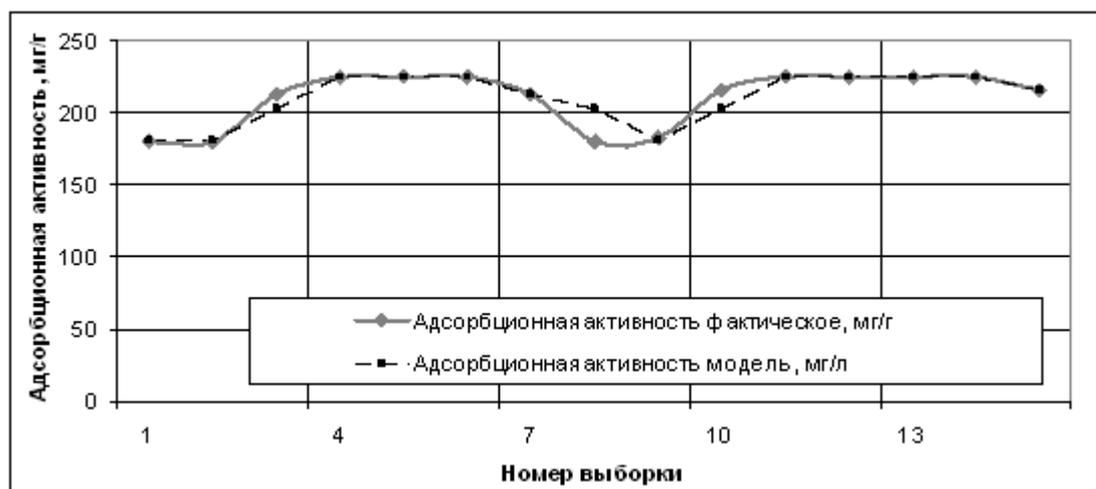


Рисунок 8 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра адсорбционная активность

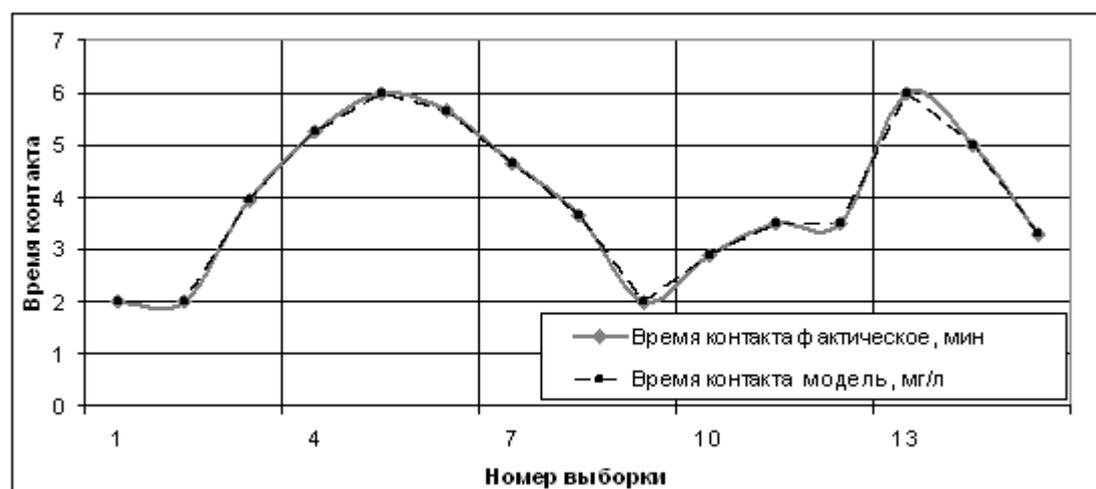


Рисунок 9 – Сравнение результатов моделирования и фактических значений для параметра время контакта с водой

Полученные на основе обученной ИНС 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%. Результаты на основе уравнений нейрорегрессии дают большую ошибку, что говорит о преимуществе применения обученной ИНС над уравнениями нейрорегрессии для технологического процесса дезодорации питьевой воды на предприятии.

Возможность применения и актуальность 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 применение модели позволило бы сократить остаток до 19 килограммов в 2013 и 17 килограммов в 2014 год. Применение разработанной модели позволило бы снизить остаток сорбента на

99,89% (с 9,0 тонн до 19 килограммов ПАУ марки ОУ-В) в 2013 год и на 99,95% (с 30 тонн до 17 килограммов смеси ПАУ марок ОУ-А и ОУ-В) в 2014 год. При средней закупочной стоимости предприятием ПАУ в 80 рублей за килограмм можно было сэкономить средства в размере 718640 рублей в 2013 году и около 2 миллионов рублей в 2014 году.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выявлена корреляционная зависимость 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, позволяющая определить эффективность технологической схемы предприятия в области дезодорации воды.

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 технологического процесса дезодорации питьевой воды, базирующийся на применении ИНС. Были скорректированы значения для дозирования сорбента, его адсорбционной активности и времени контакта. 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)), коэффициентов 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 нейрорегионном 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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

а) статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:

1. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Регрессионное моделирование концентрации геосмина в питьевой воде на основании данных МУП «Ижводоканал» // Интеллектуальные системы в производстве, Ижевск, 2015. - №2(26) - С. 107-108.
2. Пономарёв Д.С. Нейрорегрессионная модель дезодорации воды на основе многослойного персептрона // Вестник КГТУ имени А.Н.Туполева, Казань, 2015. - №1 - С. 61-62.
3. Исаков В.Г., Пономарёв Д.С. Математическая модель определения концентрации геосмина в питьевой воде // Вестник ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, Ижевск, 2016. - №1(69) - С. 59-60.
4. 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.
5. Благодатский Г. А., Бас А. А., Горохов М. М., Пономарев Д. С. Системный анализ показателей исходной воды при производстве питьевой воды в системе центрального водоснабжения // Интеллектуальные системы в производстве, Ижевск, 2018. - №2(16) - С. 84-96.

б) патенты на изобретения:

6. Способ оценки риска размножения сине-зеленых водорослей в водоеме. Патент №2559561 RU, A01K61/00 / Пономарёв С.Б., Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Гаврилов С.А - Оpubл.: 14.07.2015.

в) свидетельства на программы для электронных вычислительных машин:

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

в) публикации за рубежом:

11. Пономарёв Д.С. Improve efficiency odor removal processing of natural waters // Сборник материалов конференции V "Science, Technology and Higher Education" Канада, Вествуд, 2014. С. 28-30.
12. Пономарёв Д.С. Improve efficiency of deodorization methods in processing of drinking waters // Международная научная конференция "Наука и образование в Австралии, Америке и Евразии: фундаментальные и прикладные науки" Австралия, 2014. С. 183-184.

г) опубликованные в других научных изданиях:

13. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Анализ технологии обезвоживания осадков сточных вод // ИжГТУ, «Моделирование в экологии и медицине», Ижевск, 2011. С. 41-45.
14. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Сравнительный анализ технологии обезвоживания осадков сточных вод // ИжГТУ, «Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в 21 веке», том 3, Ижевск, 2011. С. 266-273.
15. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Comparative Analysis of Technology of Sewage Deposits Dehydration // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, EQ-2012 third forum of young researchers, Ижевск, 2012. С. 374-381.
16. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Причины возникновения запаха в поверхностных водах Ижевского пруда и перспективные методы их решения // СГАУ имени Н.И.Вавилова, «Техногенная и природная безопасность», Вторая Всероссийская научно-практическая конференция, Саратов, 2013. С. 220-223.
17. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Повышение эффективности методов удаления запахов при обработке природных вод // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, «Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке», II научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых, Ижевск, 2013. С. 266-273.
18. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Изучение проблем экологического состояния ижевского пруда и пути их решения // Камский институт гуманитарных и инженерных технологий, «III Региональная научно-практическая экологическая конференция преподавателей и студентов», Ижевск, 2013. С. 295-301.
19. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Повышение эффективности методов удаления запахов при обработке природных вод // МГТУ им. Н.Э. Баумана, в 2-х томах (2й том), Москва, 2014. С. 121-124.
20. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Increasing the efficiency of odor removal in processing of natural waters // ИжГТУ имени М.Т.Калашникова, EQ-2014 forum of young researchers, Ижевск, 2014. С. 138-140.
21. Пономарёв Д.С. Анализ и пути решения проблемы расхода адсорбента при очистке питьевой воды города Ижевска от геосмина // Томский политехнический университет, «Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения», Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск, 2015. С. 43-47.
22. Пономарёв Д.С. Анализ и пути решения проблемы запаха питьевой воды города Ижевска // БГПУ имени М. Акмуллы. «Экология и природопользование: прикладные аспекты», 5 Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Уфа, 2015. С. 203-206.
23. Пономарёв Д.С., Исаков В.Г. Оптимизация расхода адсорбента при очистке природных вод от геосмина (на основании данных МУП «Ижводоканал») // ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. Сборник материалов III Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 2015. С. 620-623.
24. Gorokhov M. M., Ponomarev S. B., Vologdin S. V., Blagodatsky G. A., Ponomarev D. S. Informatization of the quality of medical care in the management of the medical service of the federal penitentiary service of Russia. Advances in Computer Science Research (ACSR), volume 72. 2017 – P. 481-484.