

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Бакуменко Юлия Сергеевна

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОДОЕМОВ ЛУГАНСКОЙ
НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ И ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Специальность
1.6.21 — Геоэкология (географические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Работа выполнена на кафедре экологии и безопасности жизнедеятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск.

**Научный
руководитель:**

Подлипенская Лидия Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донбасский государственный технический университет»

**Официальные
оппоненты:**

Егоров Александр Николаевич, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института озераедения Российской академии наук – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Кравченко Павел Николаевич, кандидат географических наук, проректор по научной работе Частного образовательного учреждения высшего образования «Московский университет им. С. Ю. Витте»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена»

Защита диссертации состоится **26 ноября 2025 г. в 15 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 по адресу 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 98.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.365.01
кандидат технических наук



Я.А. Петров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По запасам водных ресурсов Луганская Народная Республика (ЛНР) является недостаточно обеспеченной, что связано как с природными, так и с антропогенными факторами. Особенностью водного режима рек ЛНР является неравномерное распределение стока в течение года.

В современных условиях процессы развития и преобразования водных экосистем протекают значительно быстрее, чем в XX веке, поскольку они обусловлены в основном не естественными факторами, действующими в масштабе геологического времени, а быстродействующими антропогенными. Водные объекты испытывают огромный антропогенный пресс, связанный с их многофункциональным использованием: питьевое, хозяйственно-бытовое и промышленное водоснабжение; прием сточных и дренажных вод; использование в лечебных целях и рекреация; рыбное хозяйство; гидроэнергетика, гидротехническое строительство и др., что нарушает их нормальное функционирование.

В настоящее время основными экологическими проблемами ЛНР, возникающими в сфере водопотребления и водопользования, являются:

- дефицит водных ресурсов, поскольку, начиная с 2014 г. в Республике произошли существенные сдвиги в системе водопользования и водопотребления, приведшие к увеличению значения поверхностных вод водоемов в объеме производства питьевой воды и использования их для рекреационных целей;

- увеличение загрязненности поверхностных вод, связанное с более интенсивным использованием их в промышленности и населением, устареванием очистных технических сооружений, недостаточным контролем со стороны природоохранных организаций;

- недостаточная изученность экологического состояния водных объектов ЛНР в связи с уменьшением объемов их исследований, отсутствием системного подхода к геоэкологической оценке с учетом не только качества воды, но и других влияющих факторов.

С 2024 года в ЛНР начаты работы по восстановлению водных объектов в рамках федерального проекта «Ликвидация локальных дефицитов водных ресурсов» государственной программы России «Воспроизводство и использование природных ресурсов». Для повышения экологической безопасности в области использования и охраны водных объектов необходимо регулярно осуществлять наблюдения за экологическим состоянием водоемов и водотоков, а также выполнять их геоэкологическую оценку с учетом техногенной загрязненности и особенностей регионального и локального водопользования.

В связи с этим направление исследований, связанное с изучением экологического состояния водных объектов ЛНР, возможностью их самоочищения и самовосстановления, разработкой возможных путей повышения экологической безопасности при использовании водных ресурсов, является актуальным.

Степень разработанности. Тема геоэкологической оценки водоемов исследована неравномерно по разным направлениям использования водоемов. Зачастую, исследования водоемов носят покомпонентный характер, направлены

на определенный вид водопользования. Малые водоемы практически не изучены с точки зрения геоэкологии. Теоретически и методологически исследования опираются на фундаментальные труды и концепции ведущих ученых в области геоэкологии, лимнологии и природопользования, таких как: В.А. Абакумов, О.А. Алекин, Г.М. Баренбойм, В.И. Данилов-Данильян, С.М. Драчев, А.А. Дмитриев, В.А. Жигульский, Р. Кромер, А.А. Музалевский, Н.Ф. Реймерс, Г.С. Розенберг, И.С. Румянцев, В.И. Сметанин, Ф.В. Столберг, Г.Т. Фрумин, М.П. Федоров и др. Вопросами водных ресурсов на территории ЛНР занимались Г.В. Аверин, А.Р. Зубов, Л.Г. Зубова, В.Е. Закруткин, В.И. Жадан, А.А. Крамаренко, О.П. Фисуненко и др., однако комплексная геоэкологическая оценка водоемов в связи с их многоцелевым использованием не рассматривалась.

Объект исследования — водоемы Луганской Народной Республики.

Предмет исследования — разработка методов и подходов к проведению геоэкологического анализа водоемов многоцелевого назначения и обоснование направлений по повышению экологической безопасности при их использовании.

Целью диссертационной работы является разработка системы геоэкологической оценки водоемов Луганской Народной Республики и обоснование подхода к управлению качеством питьевой воды, производимой из поверхностных вод, способствующего повышению экологической безопасности при использовании водоемов.

В соответствии с целью сформулированы следующие **задачи**:

1. Выявить проблемы экологической безопасности использования водных ресурсов Луганской Народной Республики.

2. Провести анализ существующих методов геоэкологической оценки водоемов по направлениям использования и разработать систему показателей для геоэкологической оценки водоемов многоцелевого назначения.

3. Разработать систему оценки экологического состояния водоемов ЛНР с учетом их целевого назначения, особенностей функционирования и рационального использования.

4. Исследовать статистические связи между показателями качества воды Исаковского водохранилища и разработать математические модели динамики их изменения.

5. Разработать и обосновать подход для управления качеством питьевой воды, производимой из поверхностных вод, способствующий повышению экологической безопасности в области использования водоемов.

Для решения поставленных задач **использовались следующие методы**: физико-химические и сапробиологические методы анализа воды; описательные методы; статистические методы анализа лабораторно-полевых измерений; методы системного, корреляционного, регрессионного анализа и экспертных оценок при оценке параметров математических моделей; геоинформационные системы.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Система геоэкологической оценки водоемов Луганской Народной Республики в современных условиях с учетом многоцелевого использования водных объектов.

2. Корреляционные связи и регрессионные зависимости между

показателями качества воды водоемов. Результаты математического моделирования динамики изменения показателей качества воды из поверхностных источников.

3. Методика оценки эффективности работы предприятий по водоподготовке и разработка рекомендаций по водоочистке для повышения экологической безопасности использования водных объектов. Результаты математического моделирования динамики изменения количества хлорсодержащих компонентов при водоочистке в зависимости от качества исходной воды.

Обоснованность и достоверность результатов исследований и научных выводов обеспечивается анализом предшествующих работ в области исследований геоэкологического состояния водоемов ЛНР, значительным объемом обработанного фактического материала, тщательностью отбора и анализа проб в соответствии с принятыми методиками, сопоставимостью проб по объему, применением статистической обработки.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Тема диссертационного исследования и его содержание соответствуют требованиям паспорта специальности ВАК 1.6.21 — «Геоэкология» по следующим пунктам:

п.5 Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод), наведенных физических полей, изменения состояния криолитозоны.

п.6 Разработка научных основ рационального использования и охраны водных, воздушных, земельных, биологических, рекреационных, минеральных и энергетических ресурсов Земли.

п.12 Оценка состояния водного режима территорий и геоэкологические последствия его изменения в связи с изменениями климатических параметров. Геоэкологический анализ влияния регулирования речного стока на водные, прибрежно-водные и наземные экосистемы и обоснование путей сохранения и восстановления водных и наземных экосистем.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

- выявлены характерные особенности механизма самоочищения Исаковского водохранилища на основе статистического анализа концентраций растворенного кислорода, биологического потребления кислорода и микробиологических показателей самоочищения и влияющих на них показателей;

- выполнена идентификация сезонных компонент временных рядов и построены регрессионные модели показателей качества поверхностных вод Исаковского водохранилища;

- установлены регрессионные зависимости технологических показателей производства воды из поверхностных вод водохранилища от показателей качества исходной воды, забираемой из водоема, и прочих показателей, характеризующих условия использования поверхностных вод водоема;

- разработана система комплексной геоэкологической оценки водоемов с учетом направлений и объемов их фактического использования. В работах других исследователей данный вопрос охватывал лишь качество воды без учета

фактического использования и безопасности для пользователей и биогеоценозов в целом.

Практическая значимость результатов исследования:

– разработанные алгоритмы геоэкологической оценки водоемов с учетом их многоцелевого назначения применимы как для водоемов ЛНР, так и водоемов других субъектов Российской Федерации;

– выявленные цикличности (сезонные и суточные) могут использоваться для своевременного изменения технологии подготовки воды в металлургическом производстве, коммунальном хозяйстве и при производстве питьевой воды в цехе водоподготовки ООО «Южный горно-металлургический комплекс» (ООО «ЮГМК»), а также на предприятиях с производством питьевой воды из поверхностных вод водоемов, использующих метод окисления для очистки и обеззараживания (с поправкой на местные условия).

– установленные корреляционные связи и построенные уравнения множественной регрессии применяются для прогнозирования поглощаемости хлора на первом этапе очистки воды в цехе водоподготовки ООО «ЮГМК». Текущий прогноз по моделям дает возможность своевременно реагировать на изменения в окислительно-восстановительном потенциале воды и выбирать оптимальные схемы очистки при производстве воды из поверхностных источников;

– результаты работы могут быть использованы для принятия управленческих решений в области восстановления водных систем и улучшения качества воды с применением инженерно-технических методов.

Материалы диссертационного исследования используются в учебном процессе кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «ДонГТУ» в курсе «Гидрохимия и охрана водных ресурсов».

Личный вклад соискателя. Соискатель (1) определил цели и задачи исследования, (2) выполнил обзор публикаций и интернет-источников по геоэкологической оценке водоемов с учетом их фактического использования; сформировал базу данных по химическим, бактериологическим и сапробиологическим показателям качества воды; (3) спланировал и провел экспериментальные исследования и обработку их результатов; (4) сформулировал выводы диссертации.

Апробация результатов. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на научных семинарах кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности, Научного центра экологического мониторинга окружающей среды ФГБОУ ВО «ДонГТУ»; Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 2018 г.); Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Экологический мониторинг и биоразнообразие» (Ишим, 2018 г.); Международной молодежной конференции «Планета — наш дом» (Алчевск, 2020 г.); Научно-технической конференции «Донбасс будущего глазами молодых ученых» (Донецк, 2021 г.); Международной молодежной конференции «Планета — наш дом» (Алчевск, 2021 г.); Международной молодежной конференции «Планета — наш дом» (Алчевск, 2022 г.); IV Международной научно-практической конференции

«Актуальные проблемы социально-экономического и экологического развития региона» (Алчевск, 2022 г.); Юбилейной международной научно-технической конференции «65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации» (Алчевск, 2022 г.); XIX Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2023 г.); Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Строительство и техносферная безопасность» (Антрацит, 2024 г.); IX Международной научной конференции «Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызов современности» (Донецк, 2024 г.); VIII Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2024 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве: 3 работы в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН РФ; 1 — в журнале, индексируемом в Scopus, и др.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений, содержит 182 страниц машинописного текста, 58 таблиц, 63 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлены цели и задачи диссертационного исследования, охарактеризованы научная новизна и практическое значение полученных результатов, сформулированы результаты, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ проблемных вопросов экологической безопасности использования водных ресурсов ЛНР и поставлены задачи исследования.

Анализ промышленных, сельскохозяйственных, демографических и экологических особенностей водных ресурсов региона показал, что: в ЛНР в течение 10 лет наблюдается острый дефицит питьевой воды, связанный с изношенностью водопроводных сетей, малым объемом чистой воды, доступной для подачи населению, порывами и просадками электрических сетей, что приводит к остановкам насосных станций; водоемы Луганской Народной Республики расположены неравномерно; ввиду ограниченности природных водоемов население использует находящиеся рядом водоемы для своих нужд (орошение земель, рыбная ловля, занятия спортом, купание, коммунально-бытовые нужды); искусственно созданные для накопления водных ресурсов водоемы содержат воду низкого качества (в течение года наблюдаются превышения по общесанитарным показателям, летом добавляются микробиологические); безмерное использование водных ресурсов приводит к снижению уровня воды в водохранилищах и нарушению баланса в экосистемах водоемов и близлежащих территориях.

Технологические схемы очистки отработанных вод предприятия и водоподготовки при заборе воды из открытых источников уже сильно устарели.

Необходимо провести оценку их эффективности и незамедлительно принимать меры к их модернизации или замене.

Анализ теоретических и методических основ геоэкологического исследования водоемов выявил, что отсутствует методика, которую можно использовать для оценки водоемов многоцелевого использования; геоэкологической оценкой состояния водоемов на территории ЛНР не занимаются должным образом; комплексная геоэкологическая оценка водоемов ЛНР не проводилась в течение 30 лет.

Вторая глава содержит анализ существующих методов экологической оценки водоемов, адаптированных далее для геоэкологической оценки водоемов с учетом их фактического использования. В результате была сформирована и описана система показателей для геоэкологической оценки водоемов многоцелевого назначения, которая позволяет перейти от единичных оценок качества их поверхностных вод и состояния береговых зон к безразмерным индексам и интегральным индикаторам, которые могут быть информативны в комплексной оценке с учетом всех направлений использования конкретного водного объекта в конкретном месте с учетом региональных особенностей территорий.

Система показателей геоэкологической оценки водоемов многоцелевого назначения представлена блоком оценки качества воды при определенном водопользовании водоема (рис. 1), и блоком, включающим оценки берегов при рекреационном использовании (рис. 2).

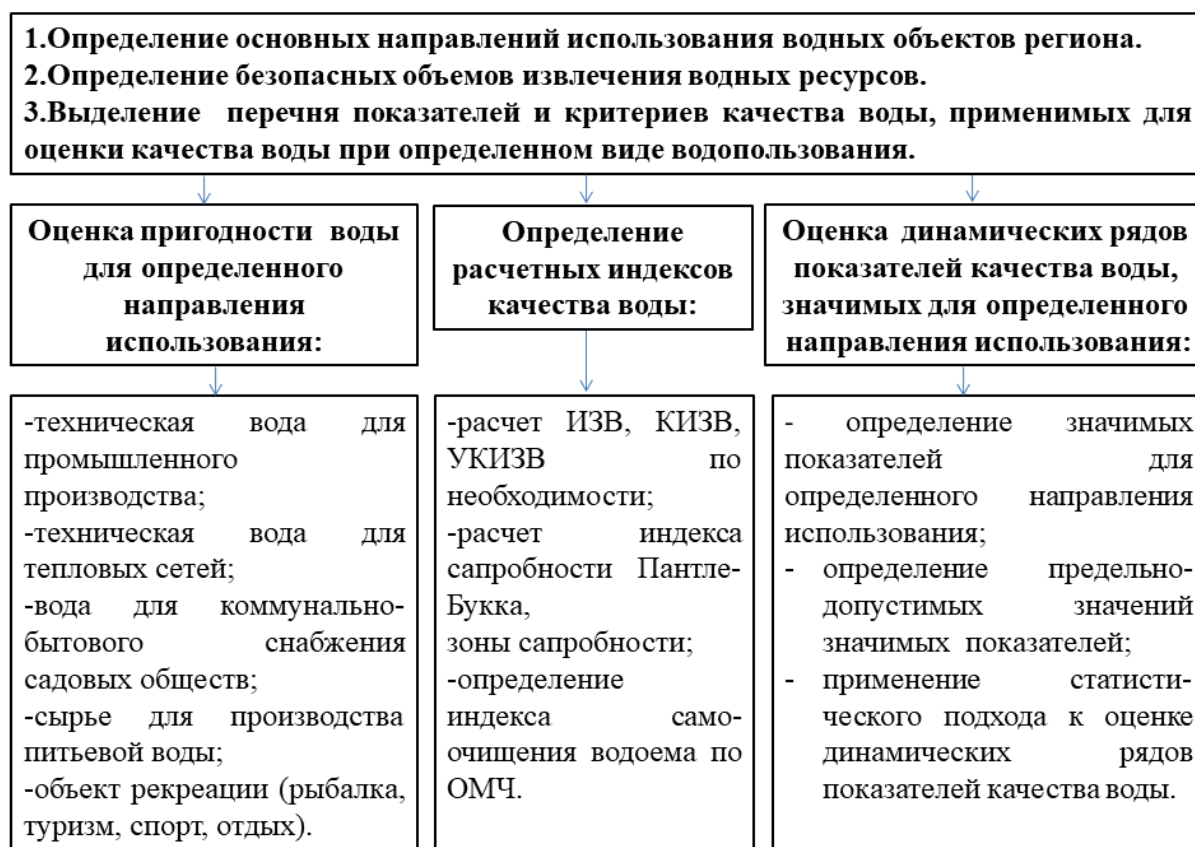


Рисунок 1 — Система геоэкологической оценки водоемов ЛНР по качеству воды с учетом многоцелевого использования водоемов



Рисунок 2 — Система показателей комплексной оценки водоемов как объектов рекреации

Третья глава содержит первый защищаемый результат исследований.

Разработанная система геоэкологической оценки водоемов с учетом их фактического использования рассмотрена на примере самого большого водоема ЛНР — Исаковского водохранилища, которое введено в эксплуатацию в 1957 г. Данный объект состоит из чаши, водоёма и непосредственно гидротехнических сооружений. Площадь зеркала при нормальном подпорном уровне (НПУ) с абсолютной отметкой 110,04 м составляет 2,93 км². Полный объём при НПУ— 20,4 млн м³. Вся территория вокруг водохранилища используется полностью (5 сел, большое количество садовых обществ, баз отдыха и т.д.). Согласно СанПиН 1.2.3685-21 и СанПиН 2.1.3684-21 Исаковское водохранилище относится к следующим группам водопользования: источника питьевого и хозяйственно-бытового водопользования, а также для водоснабжения предприятий пищевой промышленности (далее — первая категория водопользования); для рекреационного водопользования, а также участки водных объектов, находящихся в черте населенных мест (далее — вторая категория водопользования).

Оценка экологического состояния водоемов выполнялась на основе данных:

1. Результатов анализа воды химико-бактериологической лаборатории цеха водоподготовки ООО «ЮГМК» (свидетельство об аттестации ХБЛ № Рb 002/2022 от 17.01.2022), полученных при участии автора работы. Всего база данных включает информацию о 38 показателях, измеряемых ежемесячно с 2014 по 2022 гг. и 11 показателях, измеряемых ежедневно с 2014 по 2020 гг.

2. Исследований экологического состояния восьми водоемов Перевальского района и г. Алчевска, используемых населением в рекреационных целях (получены автором работы лично). Исследование, выполненное в 2021 году, включало анкетирование населения, отбор и исследование проб воды по физико-

химическим, микробиологическим и сапробиологическим показателям, оценку безопасности и удобства водоемов, определение данных для расчета их рекреационного потенциала.

В таблице 1 представлена интенсивность использования водоема по основным направлениям. Отсюда вытекает необходимость анализа качества воды по различным категориям использования.

Таблица 1 — Основные направления использования Исаковского водохранилища (с 2018 по 2021 гг.)

Месяц	Направление использования							
	Водопотребление				Водопользование			
	Техническая вода			Питьевая вода	Рекреация			
	ЮГМК	Тепловых сетей	Садовых обществ		Купание	Туризм	Спорт	Рыбная ловля
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
<i>Средний отбор воды, тыс. м³/сутки, по годам:</i>					<i>Интенсивность использования:</i>			
2018	34,9	0,5	1,2	1,3		используется в течение месяца		
2019	37,3	0,5	0,4	2,0		используется при определенных условиях		
2020	22,1	1,4	1,6	2,0				
2021	3,7	1,5	0,8	7,7		не используется		

Первичная обработка всего массива данных показала превышение и отклонение от нормы (по СанПиН 1.2.3685-21) по 6 показателям. Вода Исаковского водохранилища имеет отклонения по сухому остатку, сульфатам, содержанию растворенного кислорода и БПК₅, микробиологическим показателям относительно направлений использования (рыбохозяйственного, орошения, культурно-бытового и занятий спортом). Потребители, использующие ее в качестве технической воды, должны учитывать, что вода имеет высокий сухой остаток, жесткость и взвешенные вещества.

Оценка водоема как открытого источника питьевого водоснабжения. Так как ЛНР до 2026 года по законодательной базе находится в переходном периоде, многие предприятия и организации продолжают работать по нормативной базе Украины, внедряя постепенно нормативные документы РФ. Основной пользователь водных ресурсов Исаковского водохранилища ООО «ЮГМК» аттестован по ГСТУ 4808-2007. Результаты оценки водоема как

открытого источника питьевого водоснабжения представлены на рисунке 3. По наихудшим значениям блоковых критериев отмечаются отклонения по общесанитарным и микробиологическим показателям.

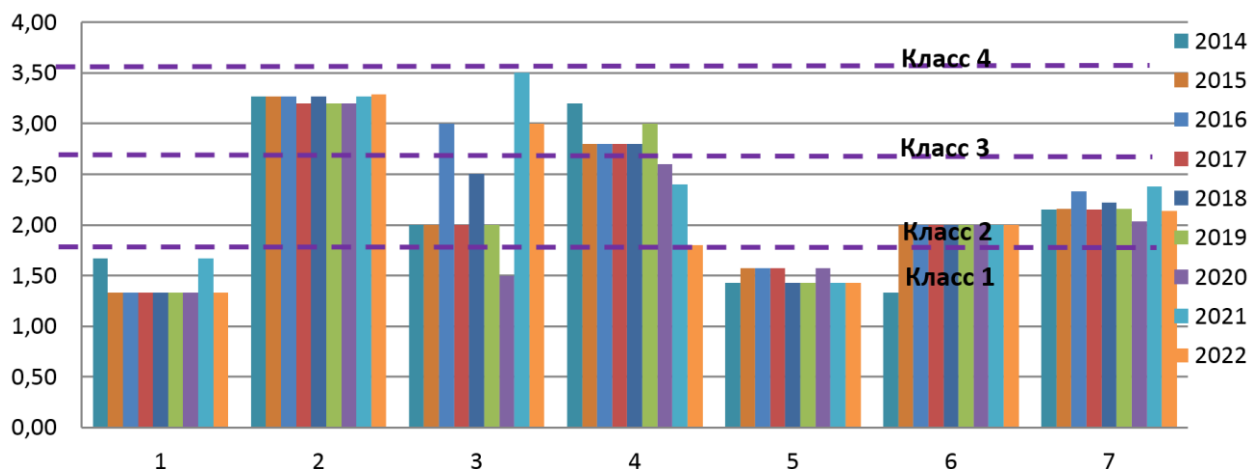


Рисунок 3 — Наихудшие значения блоковых критериев качества поверхностных вод Исаковского водохранилища как открытого источника питьевого водоснабжения за 2014–2022 годы: 1 — органолептические, 2 — общесанитарные, 3 — гидробиологические, 4 — микробиологические, 5 — токсикологические (неорганические), 6 — токсикологические (органические) показатели, 7 — интегральный показатель

Согласно рекомендациям ГСТУ 4808-2007 и ГОСТ 2761-84 для использования воды водохранилища необходимы технологии очистки воды, обладающие обеззараживающими свойствами и способные существенно снизить ее солесодержание.

Для оценки качества воды поверхностных водоемов по расчетным индексам выбраны индексы ИЗВ, КИЗВ, УКИЗВ (используется экологами для расчетов НДС), индекс сапробности Пантле — Букка для оценки загрязнения водоема органическими загрязнениями; и индекс самоочищения (по ОМЧ) для оценки способностей водоема к самовосстановлению. Предварительный расчет значения коэффициента комплексности загрязнённости воды выявил динамику изменения интенсивности загрязнения. На рисунке 4 представлены средние значения коэффициента комплексности загрязнённости по месяцам.

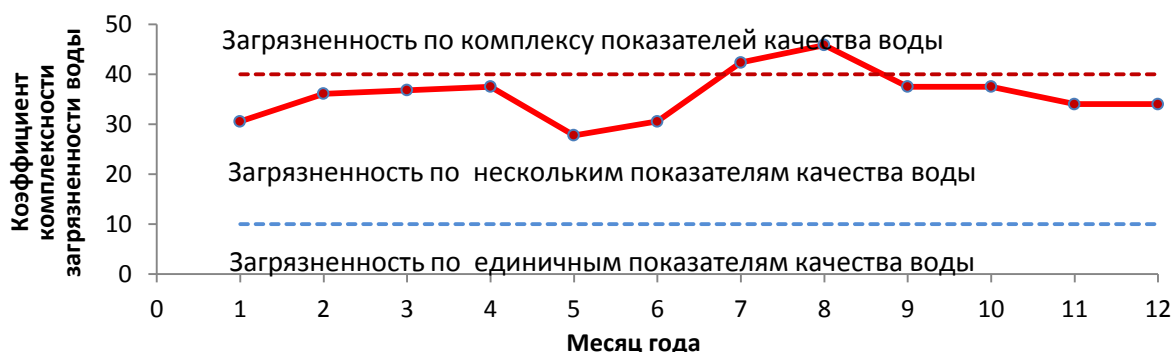


Рисунок 4 — Среднеемесячные значения коэффициента комплексности загрязнённости воды Исаковского водохранилища в месте основного забора воды ООО «ЮГМК» за 2014–2022 гг.

На основе значений показателей качества воды для различных периодов года, определены значения расчетных индексов (таблица 2). Они могут применяться при таких направлениях использования водоемов, как рекреационное, коммунальное бытовое, водоснабжение садовых обществ, а также для основных потребителей водных ресурсов для определения мероприятий, необходимых для водоподготовки.

Таблица 2 — Характеристика качества воды в Исаковском водохранилище по расчетным индексам

Группа показателей	Гидрохимические				Сапробиологические	Микробиологические
Расчетные индексы	ИЗВ	Коэффициент комплексности загрязненности	КИЗВ	УКИЗВ	Индекс сапробности	Индекс самоочищения по ОМЧ
<i>Класс качества воды</i>						
- в теплое время	3-7	(40-100] %	3	3а	3	3-5
- в холодное время	1-2	(10-40] %	3	3а	3	1-2
<i>Класс загрязнения воды</i>						
- в теплое время	Загрязненная — чрезвычайно грязная	Превышения по комплексу показателей	Загрязненная	Загрязненная	Умеренно-загрязненная	Умеренно-загрязненная — грязная
- в холодное время	Очень чистая — чистая	Превышения по нескольким показателям	Загрязненная	Загрязненная	Умеренно-загрязненная	Очень чистая — чистая

Для исследования водоемов как объектов рекреации разработана методика, предметом рассмотрения которой являются показатели качества поверхностных вод (физические, бактериологические, гидробиологические и химические) как индикаторы экологического состояния анализируемых водоемов и субъективные показатели пользователей (местонахождение, транспортная развязка, состояние берегов, наличие инфраструктуры для отдыха).

Разработаны шкалы для интегральных оценок W — «Качество воды» и U — «Удобство и безопасность отдыха», которые определяются на основе оценок отдельных показателей загрязненности водоемов и субъективных предпочтений населения (таблица 3).

Таблица 3 — Оценка качества поверхностных вод, удобства и безопасности водоема по интегральным показателям и их характеристика

Интервал	Оценка качества воды по показателю W	Оценка удобства и безопасности водоема по показателю U
1,00 – 1,99	Хорошее, приемлемое качество	Водоем недалеко, можно легко добраться, берег и дно ухоженное и безопасное, магазины в пешей доступности
2,00 – 2,99	Удовлетворительное, приемлемое качество	К водоему можно добраться только на транспорте, берег официально не убирается, но силами отдыхающих там чисто и безопасно, магазины расположены не очень близко
3,00 – 3,99	Посредственное, нежелательное качество	Проблемы с транспортом до места отдыха, дорога в неподходящем состоянии, пляжи дикие, дно опасное
4,00 – 5,00	Очень плохое качество	Водоем находится на значительном расстоянии от населенных пунктов, подъезд к водоему затруднен, мест для отдыха нет, дно опасное

Для интерпретации комплексной оценки водоемов рекреационного назначения введена матрица оценок с унифицированной единичной шкалой градаций. Переход от показателей W и U к унифицированным значениям WW и UU выполняется по формулам: $WW = \frac{5-W}{4}$, $UU = \frac{5-U}{4}$.

На рисунке 5 показаны полученные результаты исследований водоемов г. Алчевска и Перевальского района, используемых в рекреационных целях.

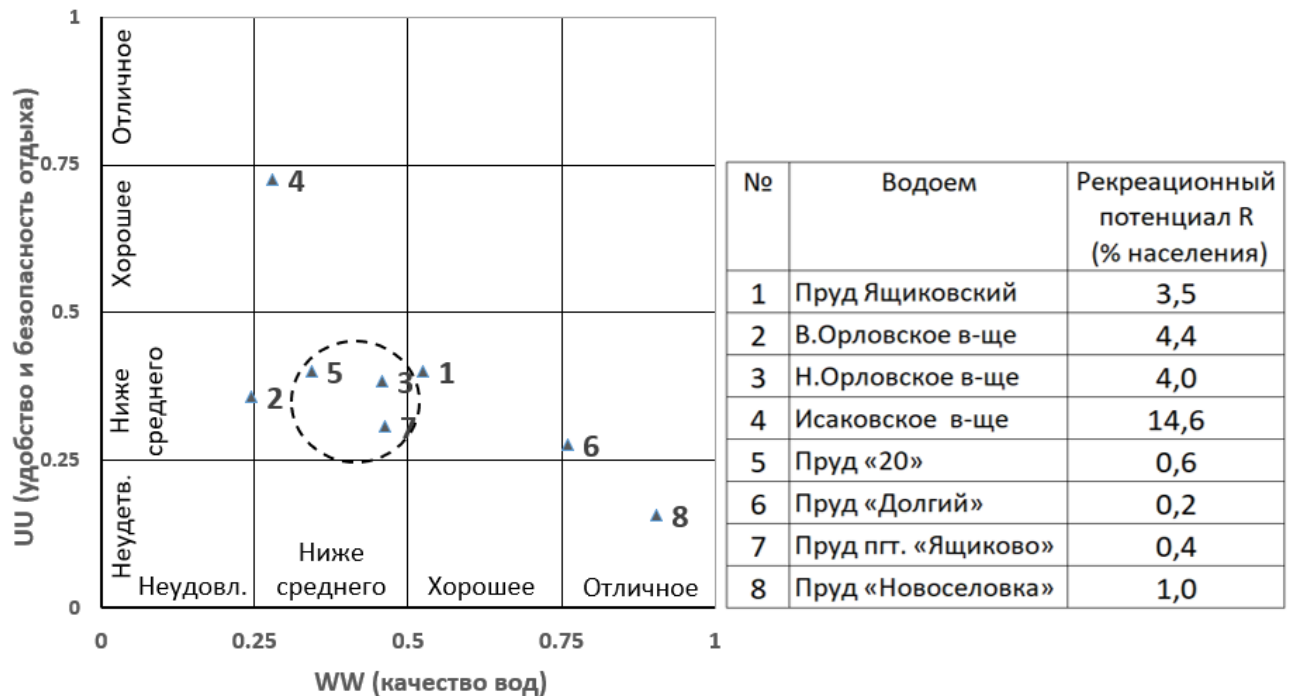


Рисунок 5 — Матрица комплексной оценки водоемов рекреационного назначения

Матричное представление двумерной оценки выбранных водоемов позволяет выполнить группировку объектов рекреации по кластерам. Так, согласно схеме рисунка 5 выделяется наиболее многочисленная группа водоемов (отмечена штриховой линией), имеющая посредственные оценки как по качеству воды, так и по удобству и безопасности отдыха. Это пруд пгт. Ящиково, пруд «20» и Нижне-Орловское водохранилище. Отдельно выделяются пруд «Новоселовка» — с отличным качеством воды, но без удобств, Исаковское водохранилище — комфорт отдыха на хорошем уровне, а качество воды — ниже среднего. Следует отметить, что в рассматриваемом районе нет идеального водного объекта рекреационного значения, имеющего отличные характеристики как по качеству воды водоема, так и удобству, и безопасности отдыха населения, однако Исаковское водохранилище выделяется как исключительное для рекреационного использования.

Результат комплексной геоэкологической оценки Исаковского водохранилища, полученной на основе разработанной системы оценки водоемов с учетом многоцелевого использования водных объектов, представлен в краткой форме в таблице 4. Комплексный характер оценки дает возможность рассмотреть водоем как со стороны природных условий и антропогенного влияния на него, так и с точки зрения привлекательности и доступности использования водных ресурсов в разных направлениях народного хозяйства.

Таблица 4 — Геоэкологическая оценка Исаковского водохранилища как водоема многоцелевого использования

Наименование водного объекта	Исаковское водохранилище				
Основные направления использования	Сырье для производства питьевой воды	Техническая вода для ООО «ЮГМК»	Техническая вода для тепловых сетей	Вода для коммунально-бытового снабжения садовых обществ	Объект рекреации (туризм, купание, спорт, рыбалка)
1	2	3	4	5	6
Безопасные объемы извлечения водных ресурсов	Полезный объем водохранилища составляет от 19700 тыс. м³ (заполнение 100%). Рациональное использование водохранилища предполагает баланс между притоком и забором воды. Природный приток составляет от 40 до 100 тыс. м³ в сутки. Забор не больше притока.				
Нормативный документ, регламентирующий требования	ГСТУ 4808-2007, СанПиН 1.2.3685-21	Требования к воде для конкретных цехов	Требования к тепловым агрегатам	СанПиН 1.2.3685-21, СанПиН 2.1.7.573-96	СанПиН 1.2.3685-21
Перечень показателей качества воды, необходимых для оценки качества воды	Органолептические, общесанитарные, гидробиологические, микробиологические, токсикологические	Взвешенные вещества, общая жесткость, сухой остаток, сульфаты, рН	Взвешенные вещества, общая жесткость, сухой остаток, сульфаты, растворенный кислород (РК), рН	Обобщенные колиформы, колифаги, запах, рН, растворенный кислород, БПК ₅ , сухой остаток, общая жесткость, сульфаты.	Обобщенные колиформы, рН, колифаги, запах, БПК ₅ , сульфаты, сухой остаток, общая жесткость, растворенный кислород
Расчетные индексы применимые к конкретному виду пользования	ИЗВ; УКИЗВ; КИЗВ индекс самоочищения по ОМЧ; коэффициент комплексности загрязненности;	ИЗВ; КИЗВ, УКИЗВ	ИЗВ; КИЗВ, УКИЗВ	ИЗВ; индекс самоочищения по ОМЧ; КИЗВ; УКИЗВ	ИЗВ; индекс самоочищения по ОМЧ, КИЗВ,
Выявленные отклонения за период:					
Круглый год	Сухой остаток, сульфаты, общая жесткость				
Теплое время	Микробиологические показатели, РК, БПК ₅ , ортофосфаты, цветность, сероводород, запах	Фитопланктон, взвешенные вещества	Фитопланктон, взвешенные вещества	РК, БПК ₅ , запах, микробиологические показатели	РК, БПК ₅ , запах, микробиологические показатели
Холодное время	Цветность, мутность		РК		
Состояние территории особенности эксплуатации	Техническое состояние плотины удовлетворительное, пригодное к эксплуатации, но требующее ремонта подпорной стенки. Забор воды производится с трёх горизонтов: верхний горизонт – 103,00 м; средний горизонт – 97,00 м; донный горизонт – 91,32 м. Требуется проведение работ по очистке дна от иловых масс.			Частично подача воды от ООО «ЮГМК»; остальная – от локальных насосов	Места для отдыха имеются, но часть из них недостаточно подготовлены для использования населением
Экспертная оценка степени соответствия требованиям (0–100) %	75 % ¾ года вода имеет второй класс качества. Требуется минимальное обеззараживание и снижение минерализации; ¼года вода имеет 3-4 класс качества и требует особой очистки	70 % Выгодное соотношение качества ресурса и стоимости сравнению с водопроводной водой	70 % Выгодное соотношение качества ресурса и стоимости по сравнению с водопроводной водой	50 % Вода подходит для полива. Для бытовых нужд есть ограничения ввиду микробиологического загрязнения и недопустимых значений органолептических показателей	50 % Большинство мест отдыха нуждаются в реконструкции, дно заилено, отсутствуют многие удобства

Информация, структурированная в таблице 4, вместе с данными таблиц 1 и 2, может быть взята за основу при создании «геоэкологического паспорта» водоема многоцелевого использования, который позволил бы принимать обоснованные рациональные управленческие решения с учетом всех направлений водопотребления и водопользования водного объекта.

Четвертая глава содержит второй **защищаемый результат исследований**. Для моделирования и прогнозирования динамических рядов показателей качества воды водоемов ЛНР сформирован статистический подход, который включает следующие этапы: 1. Организация массива данных за период многолетних исследований; 2. Первичный статистический анализ; 3. Построение моделей временных рядов с учетом сезонности; 4. Корреляционный и регрессионный анализ данных; 5. Анализ качества моделей и прогноз.

На базе данных исследования воды Исаковского водохранилища были сформированы два массива данных: 1) в разрезе суточных изменений в период 2014-2020 гг.; 2) в разрезе месячных изменений в период 2014-2022 гг.

Корреляционный анализ. Первый массив был исследован с помощью корреляционного анализа, который применялся к исходным данным (содержание в воде Fe^{2+} , Cl^- , NH_4^+ , NO_2^-) и сглаженным данным. Фильтрация данных сглаживанием позволила обнаружить тесную или даже очень тесную парную связь исследуемых показателей. В 2019–2020 гг. до 25-35 % парных связей между концентрациями показателей качества достигала 0,9, до 55 % — 0,7 и приблизительно для 10 % веществ она снижалась до уровня 0,2 и меньше: в парах медь-нитрит, медь-аммоний весной и осенью; в парах медь-хлор и медь-железо летом; в парах хлор-аммоний и хлор-нитрит летом и осенью. Таким образом, экспериментальные данные указывают на согласованную вариабельность концентрации разных веществ, загрязняющих воду Исаковского водохранилища. Это позволило выдвинуть предположение об их совместном, полном или частичном, участии в кругообороте протекающих в водном объекте симбатных процессов по принципам совместного увеличения/снижения концентрации в качестве продуктов/реагентов или роста одного за счет снижения другого по принципу «хищник/жертва» для антибатных процессов.

Полный комплекс исследований был осуществлен на базе данных за период 2014-2022 гг. по 33 показателям, характеристики которых приведены в 4 главе диссертации (4.1–4.4). В результате первичной статистической обработки выделены группы показателей (таблица 5), характеризующих среду (SR), антропогенное воздействие (А) и отклик экосистемы водоема на внешние воздействия (К). На схеме рисунка 6 представлен результат корреляционного анализа выбранных показателей в виде графа наиболее значимых корреляционных связей. Показатели группы SR выделены зеленым цветом, группы А — серым цветом, группы К — желтым цветом, дугами с весами (коэффициенты парной корреляции) показаны значимые связи между показателями, красным цветом обозначены наиболее существенные связи. Во временных рядах некоторых показателей выделена сезонность с периодом 12 месяцев. На рисунке 6 они отмечены красной звездочкой.

Таблица 5 — Показатели, выбранные для детального анализа (период 2014-2022 гг., объем выборки равен 108 месяцев)

def	Показатели	def	Показатели
Группа SR		Группа А (содержание в пробах воды)	
X1	Уровень водоема по Балтийскому морю, м	X6	Мутность, мг/дм ³
X3	Температура воды на глубине забора, °С	X8	Щелочность, ммоль/дм ³
X4	Температура воздуха, °С	X13	Сухой остаток, мг/дм ³
Группа К		X15	Хлориды, мг/дм ³
X7	Водородный показатель (рН)	X20	Сероводород, мг/дм ³
X26	Индекс самоочищения воды	X22	Нитраты-ионы, мг/дм ³
X17	Биохимическое потребление кислорода (БПК ₅), мгО/дм ³	X24	Общее микробное число (ОМЧ) при температуре 37 °С, КОЕ/см ³
X33	Растворенный кислород (РК), мг/дм ³	X10	Магний, мг/дм ³

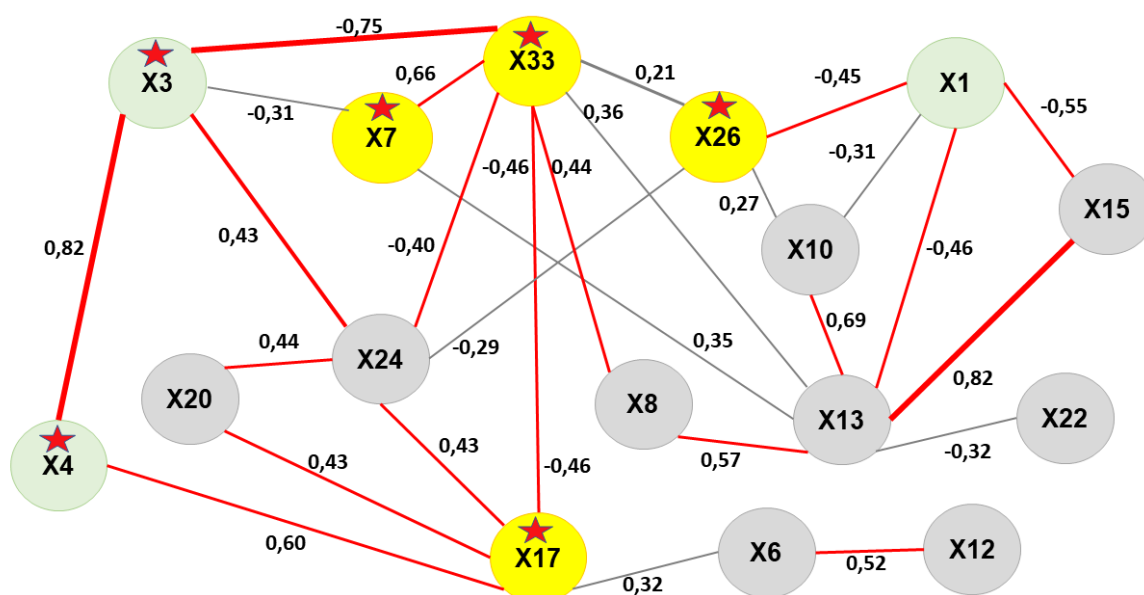


Рисунок 6 — Граф корреляционных связей показателей

Анализ графа связей по силе и числу значимых корреляций позволяет выделить три узловых показателя: **растворенный кислород (X33)** как наиболее информативный индикатор отклика водной среды водоема как на антропогенное воздействие (X24, X8, X13, X22, X20), так и на внешние условия (X3); **ОМЧ 37°/24 ч (X24)** как фактор общей зараженности воды водоема; **сухой остаток (X13)** как фактор, показывающий общую минерализацию воды. Среди внешних факторов среды выделяются температурные показатели (X3 и X4), которые задают сезонность изменения X7, X17, X26, X33.

Характерные особенности динамики самоочищения выявлены на основе корреляционного анализа показателей качества воды Исаковского водохранилища. Рост температуры воды X3 увеличивает скорость химических реакций (окисления в водоемах) и сдвигает значение pH в кислую среду

(коэффициент корреляции связи рН с ХЗ $r = -0,31$), затем запускает в водоемы как химические реакции (окисление, нитрификация), так и стимулирует рост микроорганизмов (МО). Коэффициенты корреляции температуры воды с аллохтонной микрофлорой Х24 ($r = 0,43$), внесенной в водоем в результате антропогенного загрязнения и местной — автохтонной микрофлорой Х25 ($r = 0,35$) свидетельствуют о том, что повышение температуры воды в большей степени ускоряет развитие чужеродной антропогенной микрофлоры, в чего результате индекс самоочищения Х26 существенно снижается ($r = -0,29$). Также за счет аллохтонной микрофлоры происходит повышение уровня БПК₅ ($r = 0,43$) и снижается содержание растворенного кислорода ($r = -0,40$), который идет на поглощение микроорганизмами в ходе окисления загрязняющих веществ, разрушения белков и непосредственно развития.

Роль МО в самоочищении водоема весомая, что редко учитывается в исследованиях и абсолютно не берется во внимание при определении расчетных индексов качества воды.

Математические модели для показателей РК, БПК₅ и индекса самоочищения. Содержание в воде растворимого кислорода (показатель Х33), имеющего существенное значение для самоочищения водоема, является, кроме того, самостоятельным критерием качества воды. При исследовании выборки данных содержания РК выявлены сезонная (рисунок 7) и суточная (рисунок 8) цикличности, что связано с изменениями температуры воды, освещенностью и процессами жизнедеятельности гидробионтов, потребляющих и выделяющих кислород. По методике определения содержание растворенного кислорода до 12 часов дня не должно быть ниже ПДК. Следовательно, принимаем значение показателя в 12:00 за 100 %, изменения в течение суток также выражены в процентах относительно значения 12 часов. С глубиной наблюдается снижение содержания растворенного кислорода (рисунок 9). В летний период кислородное голодание наступает уже на глубине 7–9 м. Максимальная глубина Исаковского водохранилища — 18 м.

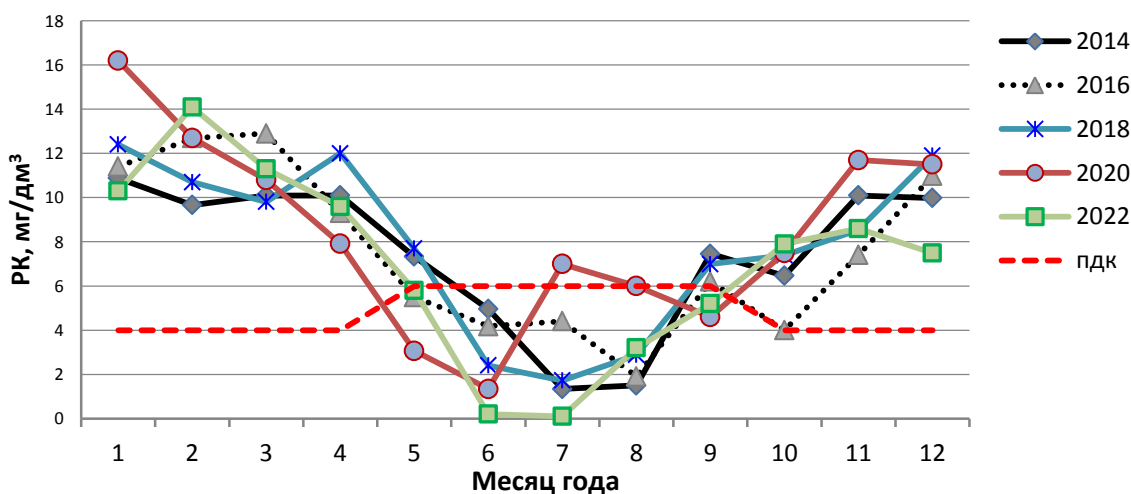


Рисунок 7 — Динамика изменения содержания растворенного кислорода в поверхностных водах Исаковского водохранилища за 2014–2022 г.

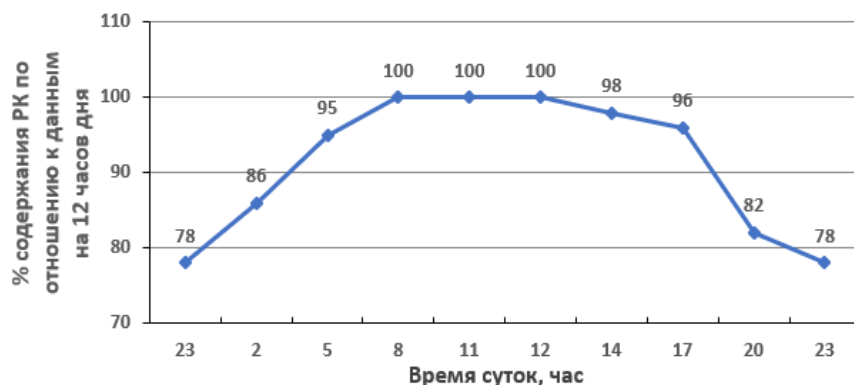


Рисунок 8 — Динамика изменения содержания растворенного кислорода в течение суток

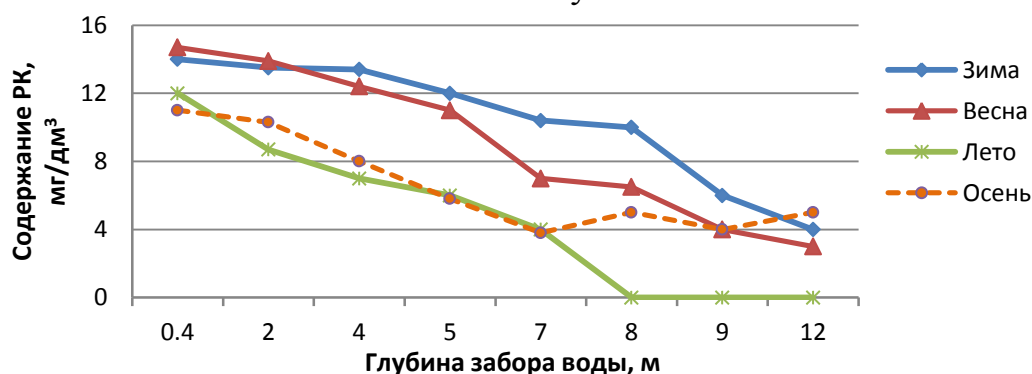


Рисунок 9 — Содержание растворенного кислорода на разных глубинах отбора проб в течение года (по сезонам)

Ряд данных содержания РК в воде (X_{PK} , мг/дм³) исследовался с использованием метода сезонной декомпозиции. Построена модель «Т+S»:

$$X_{PK} = T + S + E, \quad (1)$$

где $T = 0,0094 \cdot t + 6,8036$ — трендовая компонента, S и E — сезонная с периодом 12 месяцев и случайная компоненты соответственно, t — дискретное время (мес.).

В результате проведенного регрессионного анализа с учетом связей (рисунок 6) построены 2 модели множественной регрессии Y_{PK} :

Модель X (по данным второго массива месячных данных):

$$Y_{PK} = 7,8245 \cdot X_7 - 0,2155 \cdot X_3 + 1,3805 \cdot X_8 + 0,3482 \cdot X_{22} - 0,0097 \cdot X_{24} - 60,7169, \quad (2)$$

где коэффициент множественной корреляции R равен 0,90, ошибки 1-го рода — 8,9 %, 2-го рода — 7,1 %, СКО остатков — 1,74 мг/дм³;

Модель Z (по усредненным ежемесячно значениям первого массива суточных данных):

$$Y_{PK} = 9,8073 \cdot Z_7 - 0,2946 \cdot Z_3 + 1,5536 \cdot Z_8 - 0,0667 \cdot Z_{15} - 71,8448, \quad (3)$$

где $R=0,89$, ошибки 1-го рода — 4,5 %, 2-го рода — 5,4 %, СКО остатков — 1,73 мг/дм³.

Для проверки моделей взяты данные 2023 года (январь, февраль, март и апрель). На рисунке 10 показаны графики фактических значений показателя содержания РК и значений, спрогнозированных по описанным выше моделям.

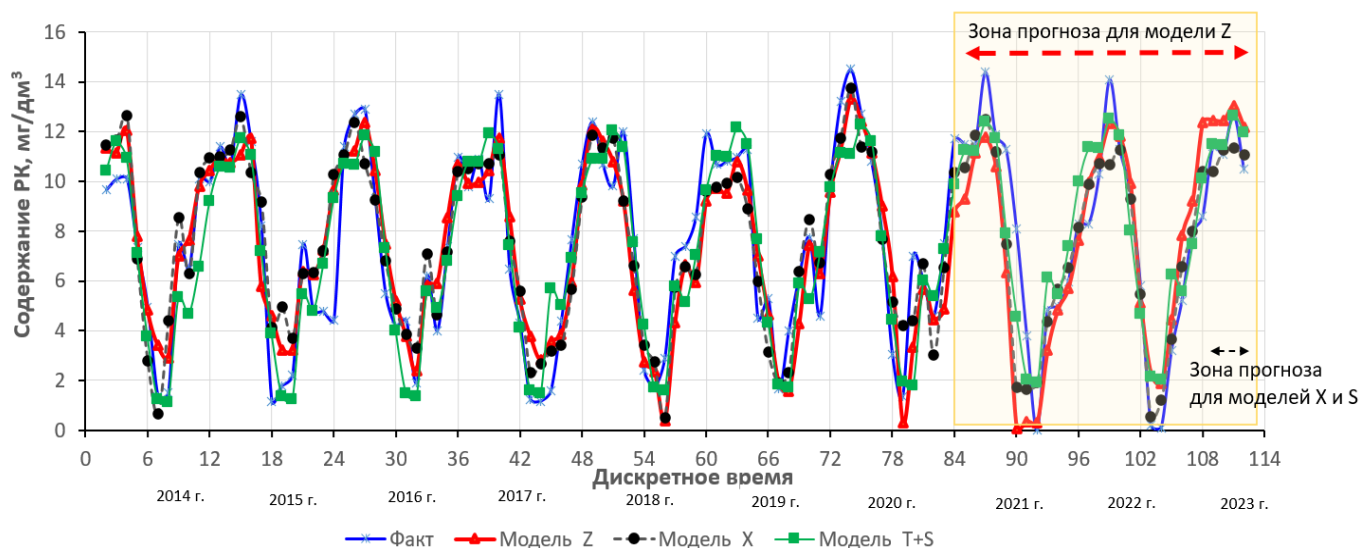


Рисунок 10 — Сравнение различных моделей динамики изменения содержания растворенного кислорода в воде Исаковского водохранилища

Исследование двух остальных интегральных показателей качества воды (БПК₅ и индекс самоочищения) выполнены аналогично. Результаты представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 — Модели временных рядов показателей качества воды методом сезонной декомпозиции (аддитивные модели)

Показатель	Диапазон значений; среднее; допустимы значения (ПДК)	S (сезонная компонента)	Уравнение модели $X = S + T$
БПК ₅ (X17), мг/дм ³	0,2–7,8; 2,40; X17 < 3	от –1,09 до 3,44	$X_{\text{БПК}} = 2,752 - 0,0064t + S$
Индекс самоочищения (X26)	0,63–69,25; 5,98; X26 > 4	от –3,90 до 8,17	$X_{\text{самооч.}} = S + 5,953$, тренд незначим

Таблица 7 — Результаты моделирования показателей методом множественной регрессии

Показатель	Уравнение множественной регрессии	R	Критерий Фишера	СКО остатков
БПК ₅	$Y_{\text{БПК}} = 1,171 + 0,0644 \cdot X_4 + 0,2417 \cdot X_6 + 1,2279 \cdot X_{20} - 0,1883 \cdot X_{22}$	0,72	20,05	1,05
X26	$Y_{\text{самооч.}} = 703,6590 - 6,3815 \cdot X_1 - 0,2474 \cdot X_3 + 0,4312 \cdot X_{10} - 0,2446 \cdot X_{15}$	0,55	10,92	7,46

Для основных промышленных потребителей водных ресурсов найденные уравнения множественной регрессии являются основой для прогнозирования необходимых мероприятий по рациональной водоподготовке и формированию запасов реагентов для водоподготовки. Фактическое использование результатов анализа массивов данных по качеству воды Исаковского водохранилища описано в пятой главе и является третьим научным результатом.

В пятой главе решена задача повышения экологической безопасности использования открытых водоемов для водоснабжения промышленных предприятий и производства питьевой воды ЦВП ООО «ЮГМК». Была разработана «Методика для оценки эффективности работы предприятий по водоподготовке». Основные этапы методики представлены на рисунке 11.

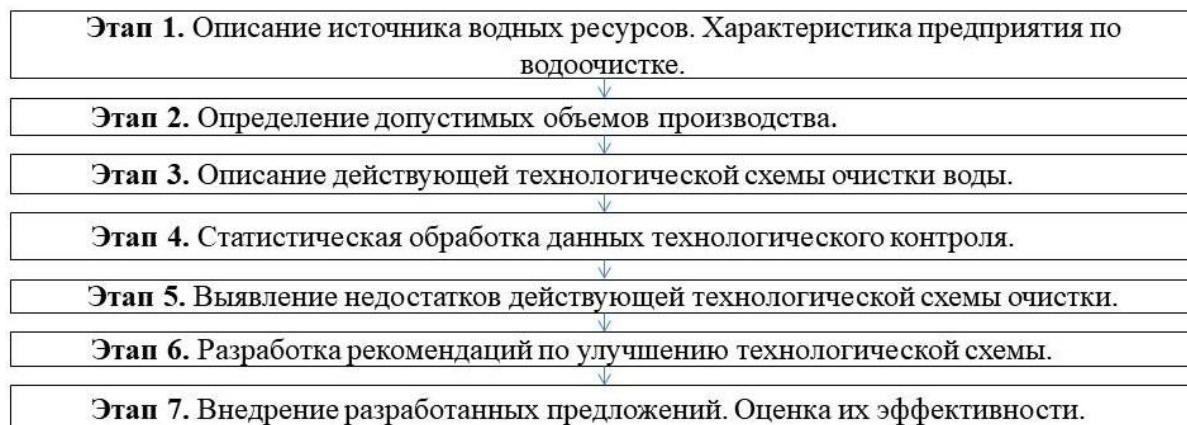


Рисунок 11— Схема этапов оценки эффективности работы предприятия по водоочистке

Поверхностным источником для производства питьевой воды является Исаковское водохранилище. Обслуживанием гидроузлов и очисткой воды вышеупомянутого источника занимается цех водоподготовки ООО «ЮГМК». Производство воды на предприятии осуществляется по технологии деминерализации исходной воды с использованием баромембранных (нанофльтрационных) машин и обеззараживания воды гипохлоритом натрия и ультрафиолетовым излучением. Схема технологии очистки воды представлена на рисунке 12.

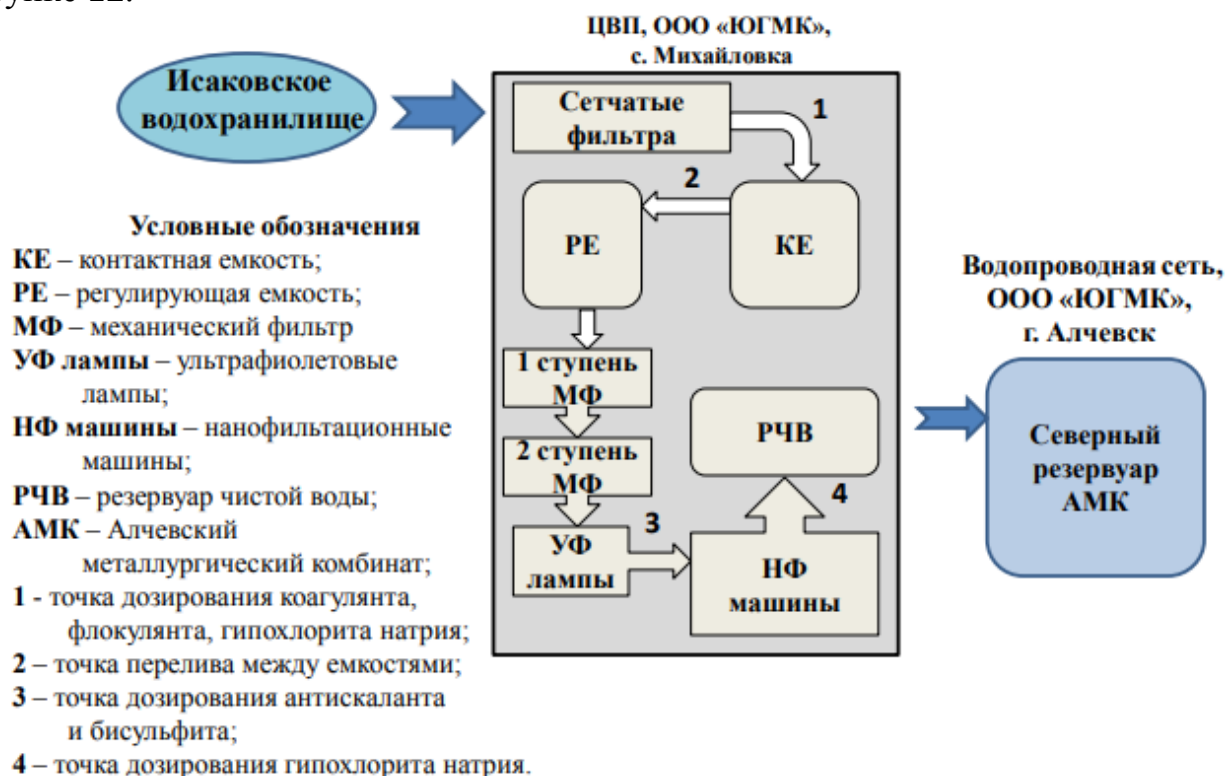


Рисунок 12 — Схема очистки воды в ЦВП ООО «ЮГМК»

При подготовке массивов и первичной статистической обработке результатов исследований проб исходной воды и данных технологического контроля за 2014–2019 годы, результатов jar-test подбора реагентов были выявлены следующие **недостатки** действующей схемы подготовки:

1. При одномоментном впрыскивании коагулянта, флокулянта и гипохлорита натрия в т. 1 (схема рисунка 12) увеличивается расход окислителя. Снижение расхода хлора возможно при разделении точек впрыскивания гипохлорита натрия и коагулянта с флокулянтом.

2. При ориентировании на результаты предыдущих исследований проб по технологическим точкам не учитываются суточные колебания поглощения хлора, связанные с колебаниями окислительно-восстановительных процессов в воде водохранилища. Обслуживающий персонал в состоянии определить только результат хлорирования. При этом задержка оперативных переключений может составить 2–4 часа. Необходимо выявить статистические зависимости показателя хлорпоглощения (ХП) от показателей качества воды, которые легко и оперативно определяются в течение нескольких минут.

3. При дозировании бисульфита не учитывается фактическое содержание остаточного хлора в воде после второй ступени. Это приводит к переизбытку бисульфита в случае низкого содержания активного хлора либо же нехватке в случае чрезмерного дозирования гипохлорита натрия на первом этапе.

Разработка рекомендаций. Основное внимание при исследовании направлено на окислительный процесс в КЕ и РЕ (схема рисунка 12). В водоеме сильным природным окислителем является растворенный кислород. При очистке воды используется гипохлорит натрия. Активный хлор является искусственным окислителем воды Исаковского водохранилища, которая поступает в ЦВП на очистку.

На рисунке 13 представлена связь между ХП и содержанием растворенного кислорода. Чем меньше растворенного кислорода содержится в воде, тем больше будет ХП. Также это подтверждается графиками на рисунке 14.

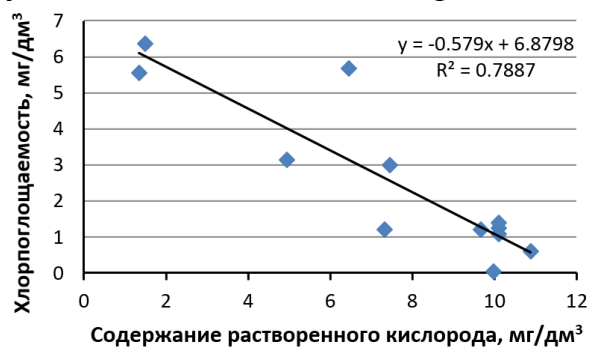


Рисунок 13 — Зависимость ХП от РК при водоподготовке 2014 г.

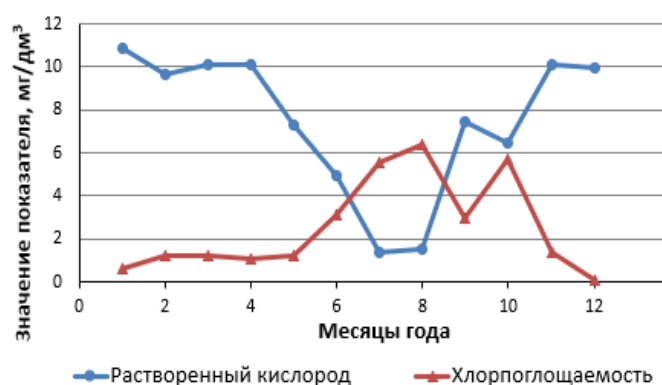


Рисунок 14 — Значения ХП и РК в течение 2014 года

Разработка рекомендации 1. В исследовании использовались результаты jar-тестов, используемых для подбора эффективной дозы коагулянтов и флокулянтов. Суть jar-теста: в химические стаканы объемом 1 дм³ с исходной

водой дозируется коагулянт (одной концентрации), флокулянт (разных концентраций) и гипохлорит натрия (такое количество, чтобы после экспозиции оставалось 0,8–1,2 мг/дм³ активного хлора). Было проведено 2 теста, которые отличаются тем, что в первом случае гипохлорит натрия добавлялся до перемешивания (таблица 8), при повторном проведении теста гипохлорит натрия дозируется после 30 мин перемешивания (таблица 9).

Таблица 8 — Сводная таблица № 1 результатов jar-теста 05.01.2019

1. Начало теста, параметры исходной воды		2. Дозирование реагентов в исходную воду, мг/дм ³					3. Промежуточные результаты после 30 мин перемешивания					4. Конечные результаты тестирования после отстаивания 30 мин.				
Цветность, град цветн	31	Коагулянт АТЕ 1102Р	1,2				Цветность, град цветн	13	13	13	13	Цветность, град цветн	13	11	11	11
Мутность, град мутн.	1,15	Флокулянт АТЕ 890	0,1	0,2	0,3	0,5	Мутность, град мутн.	0,15	0,15	0,1	0,1	Мутность, град мутн.	0,15	0,15	0,1	0,08
Остат. хлор, мг/дм ³	-	Гипохлорит натрия	3,4				Остаточный хлор	2	2	2	2	Остат.хлор, мг/дм ³	0,75	0,78	0,78	0,82
ХП, мг/дм ³	-						ХП, мг/дм ³	1,4				ХП, мг/дм ³	1,25	1,22	1,22	1,18

Таблица 9 — Сводная таблица № 2 результатов jar-теста 05.01.2019 с отдельным дозированием реагентов

1. Начало теста, параметры исходной воды		2. Дозирование реагентов в исходную воду, мг/дм ³					3. Промежуточные результаты после 30 мин перемешивания					4. Конечные результаты тестирования после отстаивания 30 мин.				
Цветность, град цветн	31	Коагулянт АТЕ 1102Р	1,2				Цветность, град цветн	13	13	13	13	Цветность, град цветн	13	11	11	11
Мутность, град мутн.	1,15	Флокулянт АТЕ 890	0,1	0,2	0,3	0,5	Мутность, град мутн.	0,15	0,15	0,1	0,1	Мутность, град мутн.	0,15	0,15	0,1	0,08
Остат. хлор, мг/дм ³	-	Гипохлорит натрия	-				Дозирование гипохлорита натрия	3	3	3	3	Остат. хлор, мг/дм ³	1	1,05	1,05	1,15
ХП, мг/дм ³	-						ХП, мг/дм ³					ХП, мг/дм ³	2	1,95	1,95	1,85

Из таблицы 8 следует вывод, что суммарное ХП в пробе составляет 2,58–2,65 мг/дм³ активного хлора в зимний период. По второму тесту суммарное ХП в пробе воды составило 1,85–2,0 мг/дм³ воды. Разница составляет почти 25 % в зимний период. В летний период, когда ХП на производстве варьируется от 3 до 6 мг/дм³, экономия может составлять 25–30 %.

Таким образом, рекомендуется разделить точки дозирования реагентов в цехе водоподготовки: т. 1 — коагулянт и флокулянт; т. 2 — гипохлорит натрия в точку перелива (Рисунок 11). Временной интервал между ними составляет

45 мин — 1 час, что позволит в КЕ сгруппировать взвешенные вещества исходной воды в инертные флоккулы, на которые не будет расходоваться активный хлор.

Разработка рекомендации 2. Поскольку значение величины поглощения хлора при водоочистке в течение года изменяется по сезонам (Рисунок 14), варьируется от 0,05 до 6,36 мг/дм³ и зависит от качества отбираемой воды, то своевременная корректировка дозы гипохлорита натрия в схеме очистки может быть осуществлена на основе прогноза хлорпоглощения.

По имеющимся в базе данным за 2014–2022 гг. были построены модели двух типов с выходным показателем ХП:

1. Модель временного ряда ХП по методу сезонной декомпозиции. Сезонная компонента варьируется с –0,93 до 1,4 мг/дм³. Тренд слабо выражен. Несмотря на четкую цикличность максимальных пиков ряда ХП, которые наблюдаются в августе каждого года, аддитивная модель сезонной декомпозиции в данном случае не работает.

2. Регрессионные модели. Согласно корреляционному анализу на ХП влияют 9 показателей качества исходной воды и температура воды на глубине забора. Для практического применения необходимо использовать уравнения с входными переменными, определение которых занимает минимальное время или может осуществляться в автоматическом режиме.

Построены регрессионные модели **X** (по месячным данным), **Z** (по усредненным помесечно суточным данным, уравнение (4)) и интегрированная авторегрессионная модель с сезонностью $S=365$ по суточным данным (уравнение (5)).

$$\text{ХП}^z = 10,5093 + 0,09199 \cdot Z3 + 0,01698 \cdot Z5 - 1,27681 \cdot Z7 + 5,88243 \cdot Z12, \quad (4)$$

где коэффициент корреляции $R=0,70$, СКО остатков — 1,021 мг/дм³.

$$\text{ХП}_t = \text{ХП}_t^z + e_{t-1} - 0,233(e_{t-1} - e_{t-2}) + 0,04(e_{t-365} - e_{t-366}) + 0,0093(e_{t-366} - e_{t-367}), \quad (5)$$

где ХП_t — прогнозное значение ХП в момент t ; ХП_t^z — значение, найденное по уравнению (4) для данных, измеренных в момент t ; e_{t-k} — разность между фактическим содержанием ХП и прогнозным по уравнению (4) в момент $t-k$.

Параметры модели (5) далее могут корректироваться по мере накопления ошибки прогноза. Проверка модели на ретроспективных данных показала среднюю относительную погрешность модели 4,9 % с горизонтом прогноза 24 дня, после чего модель перестраивается. Вклад множественной регрессии в общее значение ХП составляет в среднем 49 %, авторегрессионной модели — 50 %.

Для определения $Z3$ (температура воды), $Z5$ (цветность), $Z7$ (pH) и $Z12$ (содержание железа в воде) требуется менее 15 мин, благодаря чему существует возможность автоматизировать определение перечисленных показателей, спрогнозировать хлорпоглощение исходной воды и скорректировать дозу гипохлорита натрия, который дозируется на первом этапе очистки.

При прогнозировании дозирования хлора следует учитывать как сезонные, так и суточные колебания ХП. На рисунке 15 представлена динамика изменения

ХП и РК в течение суток относительно показания в 12 часов дня. Изменчивость ХП в течение суток составляет 20–25 %. В период с 21 часа до 5 часов утра наблюдается повышение ХП, что следует регулировать повышением дозы гипохлорита натрия.



Рисунок 15— Динамика изменения хлорпоглощения в течение суток

При реализации в цехе водоподготовки рассмотренных выше предложений достигаются следующие экономический и экологический эффекты:

1. Разделение точек дозирования реагентов приведет к снижению ХП, соответственно, к снижению расхода гипохлорита натрия до 25 %, и, следовательно, снижение вероятности образования хлороформа и хлораминов в питьевой воде.

2. Использование уравнений позволит точнее подбирать дозу гипохлорита натрия, что исключит периоды с дефицитом или же избытком активного хлора по схеме водоочистки.

3. Учет суточных колебаний хлорпоглощения минимизирует опасность недостатка дозы хлора в ночное время.

4. В целом корректная доза хлора при водоподготовке обеспечит достаточную стерильность по этапам очистки и минимизирует вероятность образования хлораминов и хлороформа в очищенной «питьевой» воде.

5. Установка автоматических датчиков определения остаточного активного хлора позволит дозировать бисульфит корректно. Таким образом, не будет превышений сульфатов в очищенной обратным осмосом воде и воде по линии байпасирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. В диссертационной работе решена задача построения системы оценки экологического состояния водоемов ЛНР с учетом их целевого назначения, особенностей функционирования и рационального использования.

2. Разработана методика исследования водоемов как объектов для рекреации и отдыха на основе множества показателей качества воды и экспертных оценок рекреационных зон. Предложена система оценок водоемов рекреационного назначения, включающая блок индикаторов качества их вод

(показатели самоочищения воды, физико-биологические, микробиологические, гидробиологические показатели), блок индикаторов удобства и безопасности отдыха, интегральные оценки по каждому блоку и комплексную оценку водоемов как объектов рекреации. Для интерпретации комплексной оценки водоемов рекреационного назначения введена матрица оценок с унифицированной шкалой градаций.

3. Выполнен корреляционный анализ взаимосвязи 28 показателей качества воды Исаковского водохранилища, установлены значимые связи, отобраны группы независимых друг от друга показателей для построения регрессионных зависимостей. Для растворенного кислорода выявлено падение концентраций с глубиной, особенно данная тенденция заметна для летнего периода. Исследован суточный ход изменения содержания растворенного кислорода.

4. Разработаны математические модели динамики изменения показателей качества поверхностных вод водоемов, основанные на методах автокорреляционного анализа и сезонной декомпозиции. Для показателей Исаковского водохранилища построены уравнения аддитивных моделей показателей, содержащие тренды и сезонные компоненты. Установлено, что концентрация растворенного кислорода и биохимическое потребление кислорода описываются адекватными статистическими моделями с 12-месячной цикличностью и возрастающим трендом для растворенного кислорода.

5. Разработаны математические регрессионные модели множественной линейной регрессии зависимостей концентрации растворенного кислорода, биохимического потребления воды и индекса самоочищения от физико-химических, микробиологических и гидробиологических показателей качества воды.

6. Впервые установлены математические зависимости технологических показателей при производстве воды из поверхностных вод водохранилища от показателей качества исходной воды, забираемой из водоема, и прочих показателей, характеризующих условия использования поверхностных вод водоема. Полученные уравнения позволяют корректировать дозу гипохлорита натрия в режиме реального времени. Внесение поправок на суточные колебания хлорпоглощаемости позволяют снизить риск недостаточной или избыточной дозировки гипохлорита натрия при прочих неизменных условиях.

7. Разработана методика оценки эффективности работы предприятий по водоподготовке и предложены рекомендации по водоочистке для повышения экологической безопасности использования водных объектов. Результаты математического моделирования динамики изменения количества хлорсодержащих компонентов при водоочистке в зависимости от качества исходной воды реализованы в цехе водоподготовки ООО «ЮГМК».

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бакуменко, Ю. С. Методика оценки рекреационного потенциала водоемов / Ю. С. Бакуменко, Л. Е. Подлипенская, М. Б. Шилин // Экология урбанизированных территорий. — 2023. — № 2. — С. 13–20. — DOI 10.24412/1816-1863-2023-2-13-20. — EDN BUUART.
2. Бакуменко, Ю. С. Статистический подход к оценке динамических изменений качества воды / Ю. С. Бакуменко, М. Б. Шилин // Естественные и технические науки. — 2023. — № 9(184). — С. 59–66. — EDN XHDWDI.
3. Подлипенская, Л. Е. ГИС-проект рекреационных водных ресурсов Луганской Народной Республики / Л. Е. Подлипенская, В. С. Федорова, Ю. С. Бакуменко. — Текст : непосредственный // Экология урбанизированных территорий. — 2024. — № 2. — С. 72–82. — DOI 10.24412/1816-1863-2024-2-72-82. — EDN FXESRO.

Публикации в журнале, индексируемом Scopus

1. Бакуменко, Ю. С. Hydrochemical dynamics of the Isakovsky / Ю. С. Бакуменко, Е. Г. Ларина, О. М. Розенталь // В сборнике: International Scientific and Practical Conference “From Modernization to Rapid Development: Ensuring Competitiveness and Scientific Leadership of the Agro-Industrial Complex” (IDSISA 2024). LesUlis, 2024. С. 14001.

Другие публикации

1. Бакуменко, Ю. С. Геоэкологическая оценка водоемов ЛНР с учетом фактического использования // Строительство и техногенная безопасность: Сборник научных трудов по материалам всероссийской научно практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (15–17 февраля 2024 г.). — Антрацит: АИГиТ (филиал) «ЛГУ им. В. Даля», 2024. — С. 130–137.
2. Бакуменко, Ю. С. Зависимость хлорпоглощения воды при водоподготовке от качества исходной воды и сезона года / Ю.С. Бакуменко // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IX Международной научной конференции (Донецк, 15–17 октября 2024 г.). — Том 2: Физические, химические, технические и компьютерные науки. Часть 1 / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. — Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. — С. 25–27.
3. Бакуменко, Ю. С. Оценка качества вод Исаковского водохранилища как альтернативного источника водоснабжения населения / Ю. С. Бакуменко, Л.Е.Подлипенская // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 4-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 22–25 мая 2018 года. Том 4. — Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2018. — С.120–124.
4. Бакуменко, Ю. С. Исследование процессов самоочищения водоемов / Ю. С. Бакуменко, Л. Е. Подлипенская // Планета — наш дом: Сб. материалов XII

Междунар. молодёжной научной конференции / Под общ. ред. В. А. Козачишена. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С.9–14.

5. Бакуменко, Ю. С. Методика оценки рекреационного потенциала водоемов / Ю. С. Бакуменко, Л. Е. Подлипенская, М. Б. Шилин // Экология урбанизированных территорий. — 2023. — № 2. — С. 13–20. — DOI 10.24412/1816-1863-2023-2-13-20. — EDN BUUART.

6. Бакуменко, Ю. С. Оценка качества поверхностных вод водоемов по индексу сапробности / Ю. С. Бакуменко, Л. Е. Подлипенская // Планета — наш дом: Сб. материалов XIII Междунар. молодёжной научной конференции / Под общ. ред. В. А. Козачишена. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С. 8–14.

7. Бакуменко, Ю. С. Статистический подход к оценке динамических изменений качества воды / Ю. С. Бакуменко, М. Б. Шилин // Естественные и технические науки. — 2023. — № 9(184). — С. 59–66. — EDN XHDWDI.

8. Бакуменко, Ю. С. Статистический анализ показателей качества вод Исаковского водохранилища как источника технической и питьевой воды // Актуальные проблемы социально-экономического и экологического развития промышленного региона: сборник материалов IV международной научно-практической конференции (19 мая 2022 г.). — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — С. 65–67.

9. Бакуменко, Ю. С. Хлорпоглощаемость как первичный показатель качества исходной воды при водоподготовке // Планета — наш дом: Сборник материалов XIV Международной молодёжной научной конференции / Под общ. ред. В. А. Козачишена. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — С. 5–10.

10. Бакуменко, Ю. С. Построение статистических моделей показателей качества поверхностных вод / Ю. С. Бакуменко, Л. Е. Подлипенская // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации : Сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции, Алчевск, 13–14 октября 2022 года. Том Часть 2. — Алчевск: Донбасский государственный технический институт, 2022. — С. 257–259.

11. Подлипенская Л. Е. Оценка экологического состояния Исаковского водохранилища в современных условиях / Л. Е. Подлипенская, Ю. С. Бакуменко // Экологический мониторинг и биоразнообразие: Материалы Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Ишим, 25–26 декабря 2018 года / Отв. ред. А.Ю. Левых. — Ишим: Изд-во ИПИ им. П.П. Ершова (филиала) ТюмГУ, 2018. — С. 34–38.

12. Подлипенская, Л. Е. Исследование процессов эвтрофикации и самоочищения водоемов / Л. Е. Подлипенская, Ю. С. Бакуменко // Экологический вестник Донбасса. — 2021. — № 1. — С. 10–18.

13. Федорова, В. С. Оценка качества поверхностных вод водоёмов как объектов рекреации / В. С. Федорова, Ю. С. Бакуменко // Экологический вестник Донбасса. — 2021. — № 2. — С. 17–27.