



МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГУМАНИТАРНО-  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ»)

ФАКУЛЬТЕТ ЕСТЕСТВЕННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КАФЕДРА ГЕОГРАФИИ, БИОЛОГИИ И ХИМИИ

**Показатели органического вещества в воде и донных отложениях  
Шершневого водохранилища**

**Выпускная квалификационная работа по направлению  
05.03.06 Экология и природопользование**

**Направленность программы бакалавриата  
«Природопользование»  
Форма обучения очная**

Проверка на объем заимствований:

78,44 % авторского текста

Работа рекомендована к защите  
рекомендована/не рекомендована

« 23 » 05. 2025 г.

И.о. зав. кафедрой географии, биологии и  
ХИМИИ

(название кафедры)

 Малаев А.В.


Выполнила:

Студент(ка) группы ОФ-423/058-4-1  
Нефёдова Анна Андреевна



Научный руководитель:

канд. хим. наук, доцент

 Сутягин Андрей Александрович

Челябинск

2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ШЕРШНЁВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА.....	6
1.1 Гидрологическая и экологическая характеристика Шершнёвского водохранилища.....	6
1.2 Динамика органического вещества и его роль в накоплении загрязняющих веществ в экосистеме водохранилища.....	12
1.3 Тяжёлые металлы в водных объектах и донных отложениях.....	31
Выводы по первой главе.....	37
ГЛАВА 2. СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ МАСС ШЕРШНЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА.....	39
2.1 Оценка общего гидрохимического состояния Шершневского водохранилища.....	39
2.2 Оценка органического вещества в водах Шершневского водохранилища.....	49
Выводы по второй главе.....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Спутниковый снимок города Челябинска.....	63
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Спутниковый снимок берега Шершневского водохранилища.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Методика определения цветности.....	65
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Методика определения прозрачности и мутности....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Инструмент для оценки мутности воды.....	67
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Методика определения температуры.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 Методика определения водородного показателя (рН).....	70

ПРИЛОЖЕНИЕ 8 Методика определения растворённого кислорода....	71
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 Методика определения БПК.....	72
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 Заросли рдестов и перифитон Шершневого водохранилища.....	73

## ВВЕДЕНИЕ

Шершнёвское водохранилище, расположенное в Челябинской области, является одним из ключевых водных объектов региона, выполняющим разнообразные функции – от обеспечения водой промышленных предприятий и сельскохозяйственных угодий до поддержания экологического баланса и рекреационных нужд местного населения. Однако, как и многие другие водные системы в условиях интенсивного индустриального развития, оно подвергается множественным антропогенным воздействиям, что ставит под угрозу его качество и устойчивость экосистемы.

Среди приоритетных химических загрязнителей окружающей среды в условиях активной антропогенной нагрузки, в том числе, производственной, выступают тяжёлые металлы. Их поступление в водоёмы не только приводит к появлению в среде суперэкотоксикантов, но и вызывает вторичные изменения экологического статуса объекта за счёт изменения интенсивности и хода протекания биохимических процессов. Одним из последствий такого поступления может выступать изменение в водной среде содержания органического вещества – продуктов метаболизма и отмирания гидробионтов. Кроме того, органические вещества могут поступать в водоёмы и от первичных источников, вызывая существенные изменения его трофического статуса. В связи с этим, анализ состояния водных ресурсов Шершнёвского водохранилища, особенно с точки зрения содержания органических веществ и тяжёлых металлов, приобретает особую актуальность в контексте текущих экологических вызовов. Исследование эколого-химического состояния воды Шершневского водохранилища актуально, так как её качество влияет на здоровье населения г. Челябинска и городов спутников, получающих воду из р. Миасс. Мониторинг качества воды лежит в основе оперативного анализа экологической обстановки и вмешательства для её улучшения.

Цель данной работы: оценка степени загрязнения органическими веществами Шершнёвского водохранилища г. Челябинска.

Задачи исследования:

1. Проанализировать и обобщить информационные данные по тематике работы.

2. Провести гидрохимический анализ воды Шершнёвского водохранилища по показателям, демонстрирующим содержание органического вещества.

3. Провести химический анализ поверхностного слоя донных отложений Шершнёвского водохранилища по содержанию тяжёлых металлов, связываемых органическим веществом.

4. Оценить уровень загрязнения воды и донных отложений Шершнёвского водохранилища органическим веществом.

Объект исследования: толща воды Шершнёвского водохранилища.

Предмет исследования: загрязнение воды и донных отложений Шершнёвского водохранилища органическим веществом.

# ГЛАВА 1. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ШЕРШНЁВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ТРАНСФОРМАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

## 1.1 Гидрологическая и экологическая характеристика Шершнёвского водохранилища

Шершнёвское водохранилище представляет собой искусственный водоём на р. Миасс, выполняющий функцию основного и единственного источника питьевого водоснабжения г. Челябинска и всего Челябинского промышленного узла, а также выполняет рекреационные и регулирующие функции.

Шершнёвское водохранилище – среднее по размерам водохранилище руслового типа, занимающее нижнее положение в каскаде с Аргазинским водохранилищем на р. Миасс. Общий объём воды в нем составляет 176 млн.м<sup>3</sup>, максимальная глубина – 14 м, средняя – 4,5 м.

Котловина Шершнёвского водохранилища имеет искусственное происхождение, построенное в 1965–1969 гг. Она расположена в западной части Челябинска и вытянута с северо-запада на юго-восток примерно на 18 км при ширине до 4 км. Берега котловины преимущественно пологие, местами обрывистые, сложены гранитами и метаморфическими породами [29].

Вдоль берегов водохранилища расположены коллективные сады, жилой частный сектор, городская высотная застройка, места массового отдыха.

Формирование качества воды и экосистемы верхнего участка – речного плёса водохранилища происходит за счёт вод, которые несёт р. Миасс, а также её приток р. Биргильда, впадающая непосредственно в реку перед расширением её русла. В верховьях Шершневского водохранилища на участке речного плёса находится пос. Сосновка, вблизи которого расположены очистные сооружения городского водоканала,

подготавливающие и снабжающие питьевой водой городские водопроводные системы.

Экологическое состояние водохранилища вызывает серьёзную озабоченность специалистов. Водоём испытывает значительную антропогенную нагрузку, являясь приёмником промышленных и коммунальных сточных вод Челябинского промышленного узла. Анализы воды регулярно фиксируют превышение предельно допустимых концентраций по тяжёлым металлам (свинцу, кадмию, меди и цинку) в 1,5–3 раза, особенно в районах, прилегающих к промышленным предприятиям. Органические загрязнения проявляются повышенными показателями БПК и ХПК, а биогенные элементы (азот и фосфор) способствуют процессам эвтрофикации, вызывая летнее «цветение» воды.

Особую экологическую проблему представляют донные отложения водохранилища, аккумулирующие загрязняющие вещества. Наибольшие концентрации тяжёлых металлов отмечаются в районе впадения реки Миасс, где мощность сапропелевых отложений достигает 1,5 м. Эти отложения становятся потенциальным источником вторичного загрязнения водной массы при изменении гидрологического режима или проведении дноуглубительных работ. Биологическая составляющая экосистемы также отражает антропогенное воздействие: в фитопланктоне доминируют цианобактерии [11].

Доминирование цианобактерий (сине-зелёных водорослей) в фитопланктоне Шершнёвского водохранилища является ярким индикатором антропогенной трансформации экосистемы. Это явление свидетельствует о прогрессирующем процессе эвтрофикации, вызванном избыточным поступлением биогенных элементов, прежде всего соединений азота и фосфора, из городских сточных вод, сельскохозяйственных стоков и ливневой канализации. Цианобактерии обладают конкурентными преимуществами в условиях загрязнённой среды: они способны фиксировать атмосферный азот, быстро размножаться в

тёплой воде, выделять в качестве продуктов метаболизма токсины, подавляющие деятельность других видов водорослей (например, фенольные соединения), а также поверхностно-активные вещества, снижающие качество воды.

Массовое развитие цианобактерий приводит к «цветению» водоёма, что сопровождается рядом негативных последствий – дефицитом растворённого кислорода в придонных слоях из-за разложения органики, изменением видового состава зоопланктона и рыб, ухудшением органолептических свойств воды (появление запаха, привкуса). Особую опасность представляют токсичные штаммы, способные выделять гепато- и нейротоксины, что создаёт риски для водопользования. Устойчивое доминирование этой группы свидетельствует о глубокой перестройке трофических связей в экосистеме и требует срочных мер по снижению нагрузки, включая модернизацию очистных сооружений и создание буферных зон вдоль береговой линии [4].

Ихтиофауна Шершнёвского водохранилища, представленная основными видами (лещом, плотвой, окунем и судаком), демонстрирует явные признаки биоаккумуляции тяжёлых металлов, особенно выраженные у хищных видов (судак, окунь). У данных видов наблюдается повышенное накопление токсичных элементов в мышечной ткани и внутренних органах: концентрации свинца, кадмия, ртути и меди у хищников в 1,5–3 раза превышают показатели у мирных рыб (лещ, плотва), что соответствует эффекту биологического усиления по трофической цепи. Основными видимыми проявлениями служат патологии развития (искривление позвоночника, аномалии жаберного аппарата), снижение репродуктивной функции (уменьшение количества икры, нарушение эмбриогенеза), изменение поведения (нарушение ориентации, снижение активности). У судака старших возрастных групп регистрируются некротические изменения в печени и почках – основных органах детоксикации [26]. Особую опасность представляет накопление ртути в



форме метил ртути у крупных хищников, способное вызывать необратимые неврологические нарушения. У мирных видов (лещ, плотва) металлы аккумулируются преимущественно в жабрах и костной ткани, тогда как у хищников – в мышечной ткани, что повышает риски для потребителей рыбной продукции. Данная ситуация связана с многолетним поступлением тяжёлых металлов из промышленных стоков и аккумуляцией их в донных отложениях, которые служат источником вторичного загрязнения [3].

Несмотря на принимаемые водоохранные меры, экологическая ситуация в Шершнёвском водохранилище остаётся напряжённой. Комплексное решение проблем водоёма требует усиления мониторинговых программ, модернизации очистных сооружений и разработки специальных мероприятий по реабилитации донных отложений. Особое значение приобретает задача сохранения водоёма как источника питьевой воды в условиях продолжающегося промышленного развития Челябинского региона.

Шершнёвское водохранилище в Челябинске характеризуется динамичными изменениями гидрологических показателей, обусловленными как природными, так и антропогенными факторами. Уровенный режим водоёма подвержен сезонным колебаниям: максимальные уровни наблюдаются в период весеннего половодья (апрель–май), минимальные – зимой и в засушливые годы, причём за последние два десятилетия отмечается тенденция к снижению уровня в маловодные периоды, например, в 2015 г. и 2021 г., что связано с уменьшением проточности р. Миасс. Полный объём водохранилища составляет 176 млн м<sup>3</sup>, полезный – 134 млн м<sup>3</sup>, однако в засушливые периоды, такие как 2010 г., наблюдалось сокращение площади зеркала на 10–15 % [11].

Температурный режим демонстрирует сезонную изменчивость: летом поверхностные воды прогреваются до 20–22 °С, зимой подлёдная

температура сохраняется в пределах 0,5–2 °С, при этом отмечается увеличение продолжительности ледостава, который в холодные зимы может достигать 150 дней. Ледовые явления обычно начинаются в ноябре–декабре, а вскрытие происходит в апреле, хотя в последние годы наблюдается тенденция к более позднему замерзанию из-за тёплых зим.

Качество воды варьирует по показателю минерализации в пределах 300–500 мг/дм<sup>3</sup>, которая повышается в маловодные периоды, а также отмечается процесс эвтрофикации, проявляющийся цветением сине-зелёных водорослей в тёплый сезон [29]. Шершнёвское водохранилище, являясь ключевым источником питьевого водоснабжения Челябинска, демонстрирует значительные изменения гидрохимических показателей, обусловленные комплексом природных и антропогенных факторов. На протяжении последних десятилетий наблюдается устойчивая тенденция к ухудшению качества воды, что особенно заметно по показателям кислородного режима, содержанию биогенных элементов и органических веществ [25].

Кислородный режим водохранилища характеризуется сезонной динамикой: в летний период содержание растворённого кислорода снижается до 6–8 мг/дм<sup>3</sup> из-за термостратификации и активного биохимического потребления, а зимой, особенно при длительном ледоставе, может падать до 4–6 мг/дм<sup>3</sup>. Такая ситуация усугубляется процессами эвтрофикации, вызванными поступлением биогенных элементов, и сбросами недостаточно очищенных сточных вод, приводящими к повышению биохимического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>) [26].

Особую тревогу вызывает динамика изменения содержания биогенных элементов. Концентрации соединений азота вблизи населённых пунктов достигают 0,5–1,2 мг/дм<sup>3</sup> для аммонийной формы и 2–4 мг/дм<sup>3</sup> для нитратов. Содержание ортофосфатов за последние 20 лет увеличилось с 0,05 мг/дм<sup>3</sup> до 0,15 мг/дм<sup>3</sup>, характеризуясь максимальными значениями в летний период. Основными источниками поступления в воду элементов –

биогенов являются сельскохозяйственные стоки, обогащённые удобрениями, а также коммунальные сточные воды, содержащие моющие средства и фекальные загрязнения.

Дополнительный приток в воду органических веществ происходит с ливневыми стоками с территории Челябинска и близлежащих посёлков, а также за счёт биологических процессов, например, интенсивного разложения водорослей в период цветения.

Как уже отмечалось, значения минерализации воды в водохранилище колеблется в пределах 300–500 мг/дм<sup>3</sup>, что соответствует пресным водам. В маловодные годы водоём демонстрирует рост данного показателя на 20–30 %. По химическому составу вода относится к гидрокарбонатному классу, группе кальция. Среди основных ионов отмечается повышенное содержание сульфатов (80–150 мг/дм<sup>3</sup>), что может быть связано с промышленными сбросами и использованием противогололёдных реагентов. По показателю жёсткости вода мягкая, имеет преимущественно слабощелочную реакцию. К приоритетным загрязнителям водоёма по исследованиям прошлых лет относят медь, марганец, цинк и железо, в анионном составе – фосфаты и нитриты. Также в различные годы были зафиксированы превышения ПДК по показателям рН, содержанию аммонийного азота, фторидов, никеля [1].

В донных отложениях и прибрежных зонах фиксируются локальные превышения ПДК по тяжёлым металлам (например, по меди), что является следствием исторического промышленного загрязнения.

Особую проблему представляет загрязнение воды водохранилища нефтепродуктами (0,02–0,05 мг/дм<sup>3</sup>, с пиками после ливневых паводков) и синтетическими поверхностно-активными веществами (0,1–0,3 мг/дм<sup>3</sup>), поступающими в водоём с поверхностным стоком с автодорог, стоянок и из коммунальных сточных вод, особенно в районах рекреационного использования.

Основными антропогенными факторами, определяющими современное гидрохимическое состояние водохранилища, являются:

- недостаточная очистка коммунальных стоков, приводящая к поступлению органики и биогенов;
- сельскохозяйственная деятельность в водосборном бассейне, способствующая эвтрофикации;
- транспортная нагрузка, являющаяся источником нефтепродуктов и противогололёдных реагентов;
- исторически сложившееся промышленное загрязнение донных отложений тяжёлыми металлами.

## 1.2 Динамика органического вещества и его роль в накоплении загрязняющих веществ в экосистеме водохранилища

Шершнёвское водохранилище, являясь важным источником питьевой воды для Челябинска, подвержено антропогенному воздействию, включая поступление тяжёлых металлов. В процессе их миграции, аккумуляции и трансформации большую роль играет содержание и качественный состав в водной массе и донных отложениях органических веществ различного происхождения. Основными источниками органического вещества в водохранилище служат природные (разлагающаяся водная растительность, гумус поверхностного почвенного стока) и антропогенные (сточные воды, сельскохозяйственные стоки) факторы.

Органическое загрязнение городских вод является одной из наиболее распространённых экологических проблем. Органические вещества в воде можно разделить на экзогенные органические вещества (органические вещества, принятые водой из внешнего мира) и эндогенные органические вещества. Экзогенные органические вещества включают органические вещества, выщелоченные из почвы поверхностным стоком и неглубокими грунтовыми водами, органические вещества, сбрасываемые в воду городскими сточными водами и промышленными сточными водами,

органические вещества, вымываемые из воздуха атмосферными осадками, органические вещества, добавляемые в воду поверхностной аквакультурой и т.д. Эндогенные органические соединения происходят из органических веществ, продуцируемых биологическими группами (водорослями, бактериями, водными растениями и крупными водорослями), выращенными в воде, и органические вещества, выделяемые из водных отложений.

Основными природными источниками органического вещества выступают процессы разложения водной растительности – как макрофитов (рдестов, элодеи, тростника), так и фитопланктона, особенно во время сезонного «цветения» воды. Прибрежные территории поставляют органическое вещество через почвенный смыв, включающий лиственный опад, гумус и грунтовые воды, выщелачивающие органические соединения из почв. Эти природные источники обеспечивают постоянное поступление гуминовых и фульвокислот, играющих ключевую роль в комплексообразовании с металлами [27].

В водной толще и донных отложениях органическое вещество взаимодействует с тяжёлыми металлами, формируя различные формы их нахождения: растворимые органо–металлические комплексы (с фульвокислотами и низкомолекулярными кислотами), взвешенные коллоидные формы (с гуминовыми веществами и органическими частицами), а также прочно связанные с гумусом осадочные формы. В окислительных условиях верхних слоёв воды органическое вещество способствует миграции тяжёлых металлов за счёт образования подвижных комплексов. В восстановительной среде донных отложений (особенно в илах) органическое вещество участвует в их иммобилизации, связывая металлы в сульфидные и органо-минеральные соединения [27].

Особенностью Шершневого водохранилища является сезонная динамика органического вещества, так, например, в весенний паводок и летнее «цветение» воды увеличивают концентрацию растворённого органического вещества, что усиливает перенос тяжёлых металлов,

а зимой при дефиците кислорода преобладает их осаждение. Загрязнение медью и цинком, характерное для промышленных регионов Урала, частично нейтрализуется за счёт комплексообразования с органическим веществом, снижая токсичность для гидробионтов. Однако при разложении органического вещества в придонных слоях возможно вторичное загрязнение воды, за счёт высвобождения металлов.

Водные экосистемы являются конечным звеном миграции большинства поступающих непосредственно в атмосферу или литосферу загрязняющих веществ, а потому могут служить индикаторами экологической ситуации среды обитания человека на примыкающих к водоёмам территориях. Естественными аккумуляторами веществ природно–техногенного происхождения в водоёмах являются донные отложения и обитающие в водной среде гидробионты [13].

Высшие водные растения – макрофиты, обладающие способностью к накоплению из водной среды и донных отложений загрязняющих веществ, представляют собой средообразующий и первично продуцирующий компонент экосистемной биогеохимической барьерной зоны, играющей важную роль в процессах передачи вещества и энергии в водных экосистемах.

Донные осадки формируются в результате оседания на дне водоёма твёрдых частиц разного генезиса. В процессе седиментации эти частицы подвергаются сложному совокупному воздействию физических, химических и биологических факторов, действие которых продолжается и после осаждения частиц на дно. Важнейшая роль донных отложений в общей экосистеме водоёма заключается в выведении вещества из водной массы за счёт седиментационных процессов, а также в обратном переносе части вещества в водную массу за счёт диагенетических преобразований в минеральных формах. Таким образом, донные отложения способствуют освобождению водной среды от части органического вещества, и сами

могут выступать в качестве источника поступления этого вещества, как ресурса жизнедеятельности организмов – продуцентов.

Определяющую роль в функционировании экосистемы водоёма играют химические элементы – органогены, входящие в состав живого вещества (С, N, P, O). Наиболее важными процессами, протекающими в донных отложениях и оказывающими влияние на состояние экосистемы, являются процессы разложения органического вещества, потребления кислорода и поступления биогенных элементов в водную массу. В отличие от водного раствора реакции в осадках протекают медленно, в связи с более низкими температурами и гетерогенностью системы равновесие устанавливается не сразу, а за более длительный промежуток времени. На трансформацию вещества в донных отложениях оказывают влияние физико-географические условия среды осадкообразования, скорость осадконакопления, минералогический и химический состав абиогенного материала, количественный и качественный состав органического вещества, поступающего в донные отложения, деятельность донных организмов, участвующих в процессе его трансформации [5].

Органическое вещество водных экосистем играет важную роль как источник поступления в водную массу азота в составе сложных соединений белковой природы и их промежуточных продуктов расщепления, формирующих в воде коллоидные растворы. Белковые соединения растительного и животного происхождения выступают в качестве главного источника азота в природных водах. Образующиеся в результате биохимического расщепления белков аминокислоты подвергаются дезаминированию с выделением аммиака и соединений аммоний. Под воздействием физико-химических и биохимических процессов они могут переходить в другие формы азота. В результате, возрастание в воде содержания белковых соединений может приводить к росту содержания неорганических форм азота, находящихся в водной массе в истинно растворённом состоянии и способных переходить друг в друга.

Особенностью воды открытых водоёмов является изменение её состава по сезонам года, сопровождающееся изменениями в количественном и видовом разнообразии микронаселения – живого органического вещества. Бактериальная загрязнённость поверхностных источников обусловлена главным образом поступлением в водоёмы поверхностного стока, содержащего органические и минеральные вещества, а также микроорганизмы, смываемые с площади водосбора. Полоса воды ближе к середине водоёмов, особенно крупных, содержит значительно меньше микроорганизмов, чем у берегов, так как при удалении от берега содержание органических веществ в воде снижается. Меняется число микроорганизмов и по вертикали от поверхности ко дну водоёма. Наибольшее их число приходится на слой воды, расположенный на глубине 5–20 м. Илы водоёмов гораздо богаче бактериями, чем вода. Так, в 1 г сухого ила содержится обычно от нескольких сотен миллионов до 2–3 млрд микробных клеток. Недостаток кислорода в грунте водоёма способствует развитию преимущественно анаэробных бактерий, получающих необходимую для жизнедеятельности энергию путём процесса брожения. Особенно много здесь бактерий, сбраживающих растительные остатки с образованием метана и водорода.

Органические вещества могут находиться в водной массе как в водорастворимой (гуматы щелочных металлов и аммония, аминокислоты, фульвокислоты и многие фульваты), так и в коллоидной и взвешенной (гуминовые кислоты, гуматы кальция, магния, железа, белки, жиры) формах. Органические вещества поступают в природную воду из почвенного и торфяного гумуса, в результате жизнедеятельности и разложения растительных и животных организмов, с бытовыми и промышленными сточными водами. Гуминовые и фульвокислоты могут находиться в почве в свободном состоянии, в виде солей с катионами щелочных и щёлочно-земельных металлов, комплексных и внутрикомплексных соединений с железом, алюминием, марганцем,



медью, в виде адсорбционных органо-минеральных соединений. Поставщиками органических веществ в природную воду могут служить наземная растительность, высшие водные растения, фитопланктон, которые выделяют бесцветные или окрашенные, без запаха или с запахом вещества, часть из которых превращается в гумусовые соединения [23].

Групповой состав органических примесей в воде крайне сложен, а его анализ затруднён многообразием форм. В то же время, органическое вещество, в том числе биологическое, выступает в качестве восстановителя, вызывая рост показателя окисляемости воды – величины, характеризующей содержание в воде органических и минеральных веществ, окисляемых одним из сильных химических окислителей при определённых условиях. Существует несколько видов окисляемости: перманганатная, бихроматная, йодатная, цериевая (методики определения двух последних применяются редко). Окисляемость выражается в миллиграммах кислорода, эквивалентного количеству реагента, пошедшего на окисление органических веществ, содержащихся в 1 дм<sup>3</sup> воды. Окислители могут действовать и на неорганические примеси, например, на ионы  $Fe^{2+}$ ,  $S^{2-}$ , но соотношение между этими ионами и органическими примесями в поверхностных водах существенно сдвинуто в сторону органических примесей [23].

Для природных малозагрязнённых вод рекомендуется определять величину перманганатной окисляемости; в то время как в более загрязнённых водах определяют также бихроматную окисляемость, или химическое потребление кислорода (ХПК), которая даёт более полное представление о содержании в воде органических веществ, поскольку при определении ХПК окисляется около 90 % органических примесей, в то время как при определении перманганатной окисляемости – только 30–50 % [6]. Являясь интегральным (суммарным) показателем, ХПК считается одним из наиболее информативных показателей антропогенного загрязнения вод. Однако не все органические вещества в равной степени

участвуют в реакции химического окисления, в связи с чем выделяют группы легко, нормально и тяжело окисляющихся органических веществ, и существуют различия между теоретически возможным и практически достигаемым значениями ХПК. Для трудно окисляющихся органических веществ характерно неполное окисление, что приводит к занижению результатов определения ХПК. В то же время, при наличии в пробе неорганических восстановителей, также потребляющих кислород на собственное окисление, результат становится завышенным. Совместное действие обоих факторов вызывает отклонение реального ХПК от  $XPK_{теор}$ . Результаты определения окисляемости одной и той же воды с помощью разных окислителей различны из-за различной полноты окисления веществ, присутствующих в воде [6]. В то же время, величины как перманганатной, так и дихроматной окисляемости позволяют проводить оценку степени загрязнения вод (таблицы 1, 2), выступая косвенным показателем содержания в ней органического вещества. Более полную картину загрязнённости представляет значение дихроматной окисляемости, но величина перманганатной окисляемости представляет собой более важный с точки зрения экологического состояния водоёма показатель, так как она демонстрирует содержание легко окисляемых, то есть более биологически активных восстановителей. Бихроматная окисляемость определяется методом титрования. К пробе воды добавляют бихромат калия, избыток которого после реакции окисления оттитровывают солью Мора в присутствии индикатора, в качестве которого обычно используют ферроин (комплекс 1,10-фенантролина с сульфатом железа(II)) или N-фенилантралиловую кислоту. Индикатор образует интенсивно окрашенное соединение с  $Fe^{2+}$ , и бесцветное – с  $Fe^{3+}$ . По этой причине, когда избыток бихромата оттитрован,  $Fe^{2+}$  реагирует с индикатором с образованием ферроинового комплекса. При этом окраска раствора изменяется от синевато-зелёной до красно-коричневой, указывая на достижение конечной точки титрования [9].

Таблица 1 – Характеристика вод по перманганатной окисляемости

Величина окисляемости	Значение окисляемости, мг/дм <sup>3</sup>
Очень малая	До 4
Малая	Более 4 до 8
Средняя	Более 8 до 12
Высокая	Более 12 до 20
Очень высокая	Более 20

Таблица 2 – Характеристика вод по бихроматной окисляемости

Степень загрязнения	К, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Очень чистая	1
Чистая	0
Умеренно загрязненная	3
Загрязненная	4
Грязная	5–15
Очень грязная	Более 15

Показатель перманганатной окисляемости позволяет оценить содержание в воде легкоокисляемых органических соединений. Максимальное и минимальное значения перманганатной окисляемости за всю историю существования Шершневого водохранилища отмечены в первое десятилетие эксплуатации водоёма как в период половодья, так и в летне-осеннюю межень (14,3 мг/дм<sup>3</sup> и 5,5 мг/дм<sup>3</sup> ; 14,6 мг/дм<sup>3</sup> и 5,7 мг/дм<sup>3</sup>). Со временем происходит достоверное уменьшение окисляемости в каждую из исследуемых фаз гидрологического режима, что свидетельствует о снижении количества легкоокисляемых веществ в воде Шершневого водохранилища

Предыдущие исследования показывают, что для воды Шершневого водохранилища максимальные значения величины перманганатной окисляемости ( $14.6 \text{ мг/дм}^3$ ) были характерны на первых этапах его функционирования (Рисунок 1). Со временем же вода характеризуется динамичным снижением данного показателя, и фиксируемые за последние годы значения перманганатной окисляемости составляют  $5,8\text{--}7,5 \text{ мг/дм}^3$ , что свидетельствует о снижении вклада в загрязнение легко окисляемых органических веществ. Несмотря на это, определяемые значения ХПК воды достигало значений в пределах  $17,0\text{--}24 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ , что свидетельствует о присутствии в воде большого количества трудно окисляемых органических веществ и позволяет относить воду водохранилища к категории очень грязной. Сравнение результатов с нормативными значениями для вод хозяйственно-питьевого водопользования демонстрирует случаи превышения значений ХПК от 1,13 до 1,93 раза и перманганатной окисляемости в 1,16 раза.

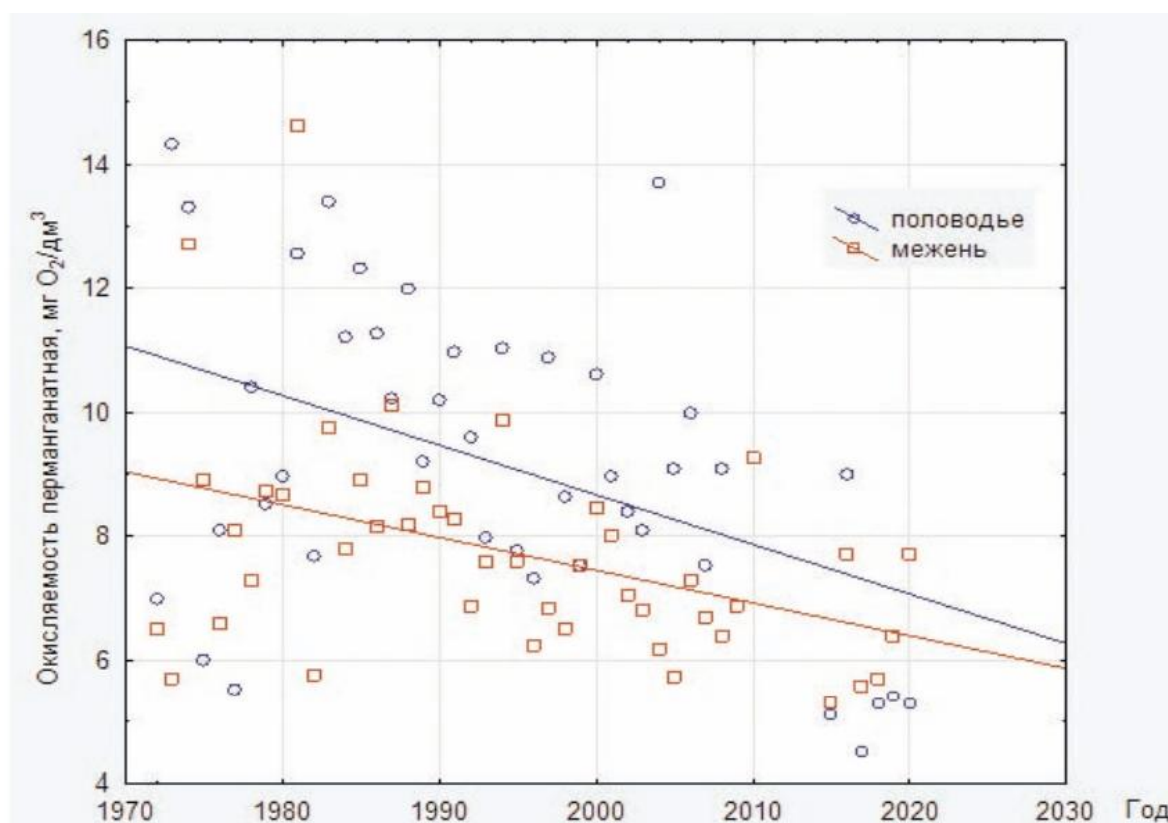


Рисунок 1 – Многолетняя динамика изменения величины перманганатной окисляемости воды Шершневого водохранилища [20]

Наличие органических веществ, выступающих в качестве восстановителей, приводит к быстрому расходованию кислорода, играющего в воде роль наиболее распространённого окислителя. В связи с этим, содержание растворённого в воде кислорода также рассматривается в качестве косвенного показателя, связанного с количественным содержанием в воде органического вещества. При высоком содержании в воде органических соединений содержание растворённого в воде кислорода может резко снижаться, достигая практически полного его расходования. При этом создаются анаэробные условия, способствующие возрастанию в загрязнение водной среды продуктами разложения, восстановителями, такими как сероводород, аммиак, соединения аммония. Присутствие большого количества органических веществ создаёт в донных грунтах устойчивую восстановительную анаэробную среду, в которой возникает особый тип иловых вод, содержащих сероводород, аммиак, ионы металлов в восстановленной форме [3].

В то же время, содержание растворённого в воде кислорода контролируется активностью живого органического вещества, прежде всего, процессом фотосинтеза. Конкуренция двух процессов – разложение органического вещества и фотосинтез (производство органического вещества) обуславливают общий кислородный режим водоёма и формирование в нем аэробных или анаэробных условий.

Шершневское водохранилище ежегодно характеризуется интенсивным «цветением» в летне-осенний период, что приводит к повышению величины содержания растворённого в воде кислорода, связанной с фотосинтетической активностью сине-зелёных водорослей. Так, в летний период эта величина в отдельные периоды возрастала до 12 мг/дм<sup>3</sup>, а степень насыщения воды кислородом при «цветении» достигала в отдельные годы 120 %, что свидетельствует об интенс-

фикации процессов новообразования первичной продукции и фотосинтеза в водоёме (Рисунок 2).

Показатель перманганатной окисляемости (ПО) позволяет оценить содержание в воде легкоокисляемых органических соединений. На изменение концентрации легко окисляемых веществ влияет поступление загрязнений извне – из других водных объектов, с атмосферными осадками и поверхностным стоком. Большую роль оказывают внутриводоёмные биохимические процессы продуцирования и трансформации органического вещества. Максимальное и минимальное значения ПО за всю историю существования Шершневого водохранилища отмечены в первое десятилетие эксплуатации водоёма как в период половодья, так и в летне-осеннюю межень. Со временем происходит достоверное уменьшение окисляемости в каждую из исследуемых фаз гидрологического режима ( $F=10,04$ ,  $p=0,0017$  и  $F=8,850$ ,  $p=0,0026$ ), что свидетельствует о снижении количества легкоокисляемых веществ в воде Шершневого водохранилища.

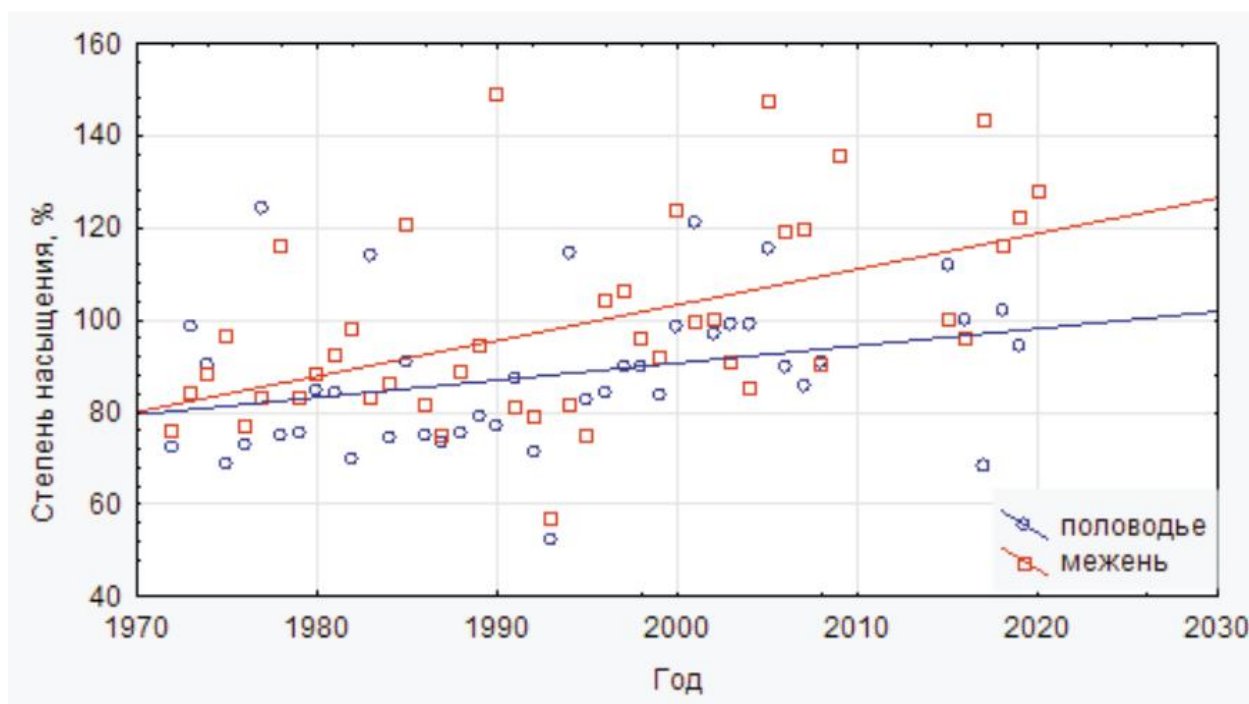


Рисунок 2 – Многолетняя динамика изменения степени насыщения кислородом воды Шершневого водохранилища [20]

Важнейшим показателем содержания органического вещества выступает величина биохимического потребления кислорода (БПК) определяемая путём сравнения концентрации растворённого кислорода в воде при первоначальном отборе пробы и после завершения периода инкубации. Пробы помещают в герметичные сосуды, где происходит биохимическое окисление органических веществ микроорганизмами. Поскольку скорость этого процесса критически зависит от стабильности температуры (допустимые колебания не превышают  $\pm 1$  °С), достоверность результатов анализа БПК напрямую определяется точностью соблюдения температурного режима. Стандартная продолжительность исследования составляет 5 суток, поэтому определяемый показатель обозначается как БПК<sub>5</sub>. Этот параметр является важным критерием оценки степени загрязнения воды органическими веществами [4] (Таблица 3).

Таблица 3 – БПК<sub>5</sub> в водоёмах с разным уровнем загрязнения [4]

Уровень загрязнения	Уровень загрязнения БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Очень чистые	0,5–1,0
Чистые	1,1–1,9
Умеренно загрязненные	2,0–2,9
Загрязненные	3,0–3,9
Грязные	4,0–10,0
Очень грязные	10,0

Показатель БПК<sub>5</sub>, характеризующий содержание органических веществ в воде, в первую очередь, связан с жизнедеятельностью гидробионтов и внутриводоёмными процессами, а также с поступлением загрязняющего органического вещества антропогенного происхождения

По литературным данным на первых этапах эксплуатации вода водохранилища характеризовалась колебаниями значений БПК<sub>5</sub> в широком интервале от 0,52 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> до 12 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. В дальнейшем диапазон существенно снизился до интервала 2,0–6,0 мгО/дм<sup>3</sup>, но с 2003 г. он вновь

вернулся к первоначальным значениям от  $1,8 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$  до  $12 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ , что может характеризовать общий уровень накопления органического вещества в экосистеме водоёма (Рисунок 3).

В фазе летне-осенней стабилизации уровня воды БПК<sub>5</sub> характеризует, в основном, процессы биологического окисления, продуцируемого первичного органического вещества в водном объекте [20].

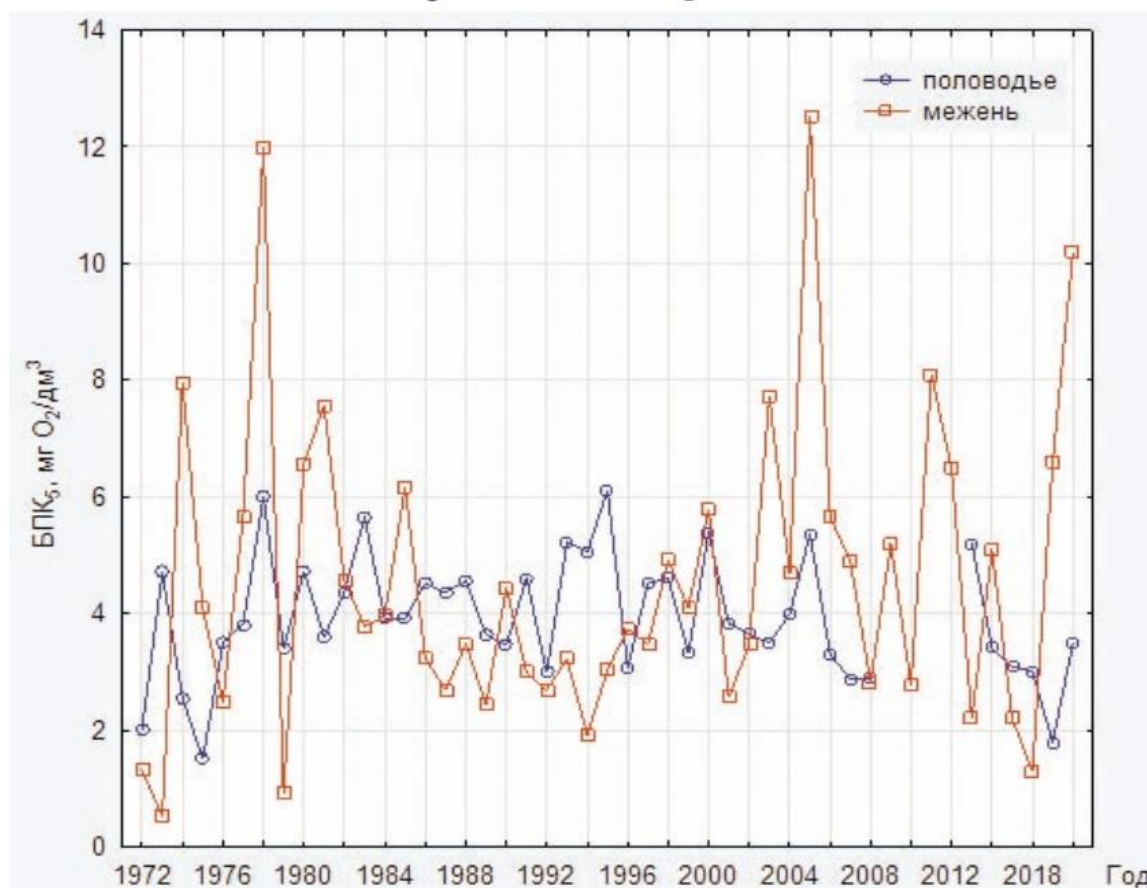


Рисунок 3 – Многолетняя динамика изменения величины БПК<sub>5</sub> воды Шершневого водохранилища [20]

Содержание органических веществ в воде находится в непосредственной взаимосвязи с уровнем водородного показателя рН, оказывая взаимное влияние друг на друга. В состав органических соединений воды большой вклад вносят гумусовые вещества, содержащие в своём составе гидроксильные группы фенольной природы, а также кислотные карбоксильные группы. Фракционный состав гумусовых веществ представлен преимущественно гуминовыми кислотами, растворимыми при более высоких значениях рН, но нерастворимыми в



сильно кислых условиях ( $\text{pH} < 2$ ). Вторая фракция – фульвокислоты, растворима при всех значениях  $\text{pH}$  [23].

При повышенном содержании органического вещества, в том числе гуминового, в воде происходят биохимические процессы его разложения, в результате которых выделяются продукты кислотного характера и углекислый газ. Продукты распада способствуют изменению кислотно-щелочного баланса, чаще всего приводя к подкислению воды. Особенно заметно это проявляется в стоячих водоёмах с большим количеством органических остатков, где активное разложение материала микроорганизмами вызывает существенное снижение  $\text{pH}$ .

Обратная зависимость проявляется в том, что сам уровень  $\text{pH}$  существенно влияет на скорость и характер разложения органических веществ. Наиболее благоприятные условия для этого процесса создаются в нейтральной среде ( $\text{pH} = 7$ ), где микроорганизмы проявляют максимальную активность. В кислых водах ( $\text{pH} < 6$ ) биологическое разложение замедляется, что может приводить к накоплению органических остатков. В щелочной среде ( $\text{pH} > 8$ ) некоторые органические соединения подвергаются ускоренному гидролизу, но при этом может снижаться эффективность работы микроорганизмов [2]. Эти взаимосвязи имеют важное практическое значение для оценки состояния водных экосистем. Например, резкое изменение  $\text{pH}$  воды может служить индикатором органического загрязнения, а неестественно высокое или низкое значение  $\text{pH}$  может указывать на нарушение естественных процессов самоочищения водоёма. Кроме того, в щелочной среде некоторые органические вещества (например, фенолы) могут приобретать повышенную токсичность, что необходимо учитывать при экологическом мониторинге [2].

Литературные данные о многолетней динамике показателя  $\text{pH}$  водной массы Шершневого водохранилища демонстрируют стабильный нейтрально-щелочной характер среды ( $\text{pH} = 7.9\text{--}8.9$ ) с устойчивым сдвигом в щелочную среду в летний период.

Во время прохождения материала, содержащего органические загрязнители, сквозь столб воды, часть загрязняющих веществ переходит в раствор, изменяя качество воды, другая сорбируется частицами взвеси и переходит в донные отложения. В то же время, достаточно большое количество органических веществ не образует истинных растворов и не осаждается в донные отложения, но либо сорбируется на взвешенных в воде частицах, либо формирует коллоидные растворы. Этот процесс сопровождается возрастанием мутности воды в поверхностном слое (0,5 м) преобладали растворённые формы органики, что, вероятно, обусловлено фотохимическим и микробиологическим разложением аллохтонных веществ, поступающих с водосборной территории.

В начальный период формирования водохранилища среднее значение минерализации составляло в половодье  $257,4 \text{ мг/дм}^3$ , в межень –  $278,2 \text{ мг/дм}^3$ , в настоящее время –  $233,2 \text{ мг/дм}^3$  и  $237,3 \text{ мг/дм}^3$  соответственно. Таким образом, наблюдается тенденция к опреснению воды в Шершнёвском водохранилище за многолетний период [17].

Литературные данные свидетельствуют о том, что с момента начала функционирования водохранилища его вода характеризуется снижением значений мутности (от  $40 \text{ мг/дм}^3$  до  $5 \text{ мг/дм}^3$ ). Интересен тот факт, что если до 2010 г. значения мутности воды в период половодья существенно повышали соответствующие значения для периода межени, то с 2010 г. определяемые значения для указанных периодов практически выровнялись (Рисунок 4).

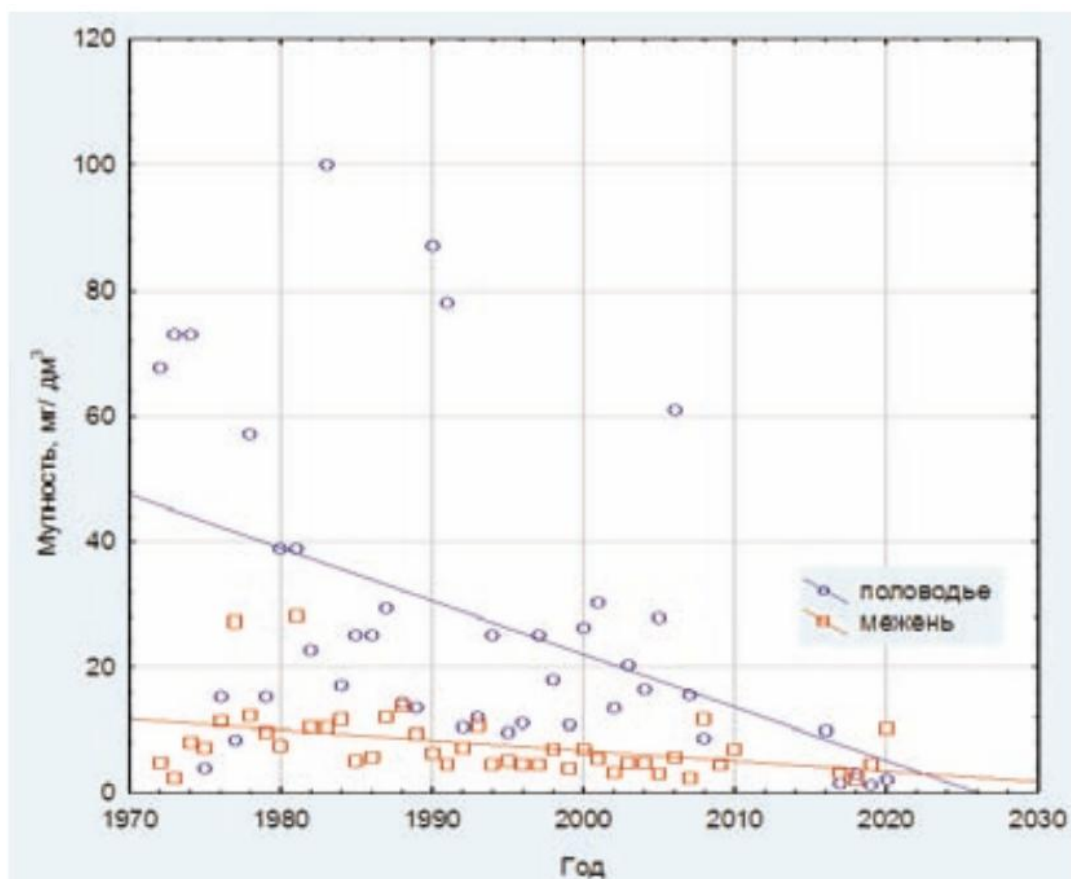


Рисунок 4 – Многолетняя динамика изменения величины мутности воды Шершневого водохранилища [20]

При этом, для этапа половодья выявлена достаточно чёткая корреляция между значениями мутности и содержанием в воде взвешенных веществ, что может быть обусловлено совместным влиянием на данные показатели живого органического вещества микробиологического происхождения (бактерии-, фито- и зоопланктона). На начальных этапах функционирования Шершневого водохранилища концентрация взвешенных веществ в воде варьировала в широком диапазоне от 5,8 мг/дм<sup>3</sup> до 107,5 мг/дм<sup>3</sup>, при этом основным источником поступления взвесей выступали компоненты поверхностного стока, содержащие большое количество органического вещества.

По мере стабилизации структуры береговой зоны водохранилища содержание взвешенных веществ в воде резко снизилось, а на современном этапе оно варьирует в диапазоне концентраций от 3 мг/дм<sup>3</sup> до 24 мг/дм<sup>3</sup>. Такое снижение связано с существенными изменениями структуры

водосборной территории от сельскохозяйственной с высокой степенью распаханности до территории жилищной застройки. Современное состояние прилегающих территорий характеризуется большими площадями асфальтового и бетонного покрытия, что существенно снижает внешний приток органического вещества в воду. В итоге, на настоящем этапе состав органического вещества воды водохранилища в большей степени контролируется жизнедеятельностью гидробионтов [13].

Представляя собой сложную матрицу органических материалов, органические вещества являются одним из основных факторов ухудшения качества воды. Так, многие органические вещества, особенно природного происхождения, представляют собой окрашенные соединения, повышая показатель цветности воды (особый вклад в этот процесс вносят гуминовые вещества, вносимые в водную массу с поверхностным почвенным стоком).

Для вод Шершневского водохранилища за время с момента начала функционирования характерны значительные колебания цветности воды от 24 до 220 градусов по платиново-кобальтовой шкале. При этом отмечается, что в период половодья наблюдается стабильный рост этого показателя по сравнению с летне–осенней меженью (Рисунок 5). Анализ многолетней динамики изменения показателя цветности демонстрирует высокую степень его корреляции с изменением значений мутности воды, что может свидетельствовать о вкладе в данные показатели содержания гуминовых веществ.

За исследуемый период отмечена тенденция к увеличению степени насыщения кислородом и в фазу половодья, и в фазу межени, но статистически значимые изменения отмечены только для межени ( $F=14,81272$ ;  $p=0,0008$ ). В фазу половодья данный показатель увеличивается примерно на 20 %, в межень – на 40 % [20].

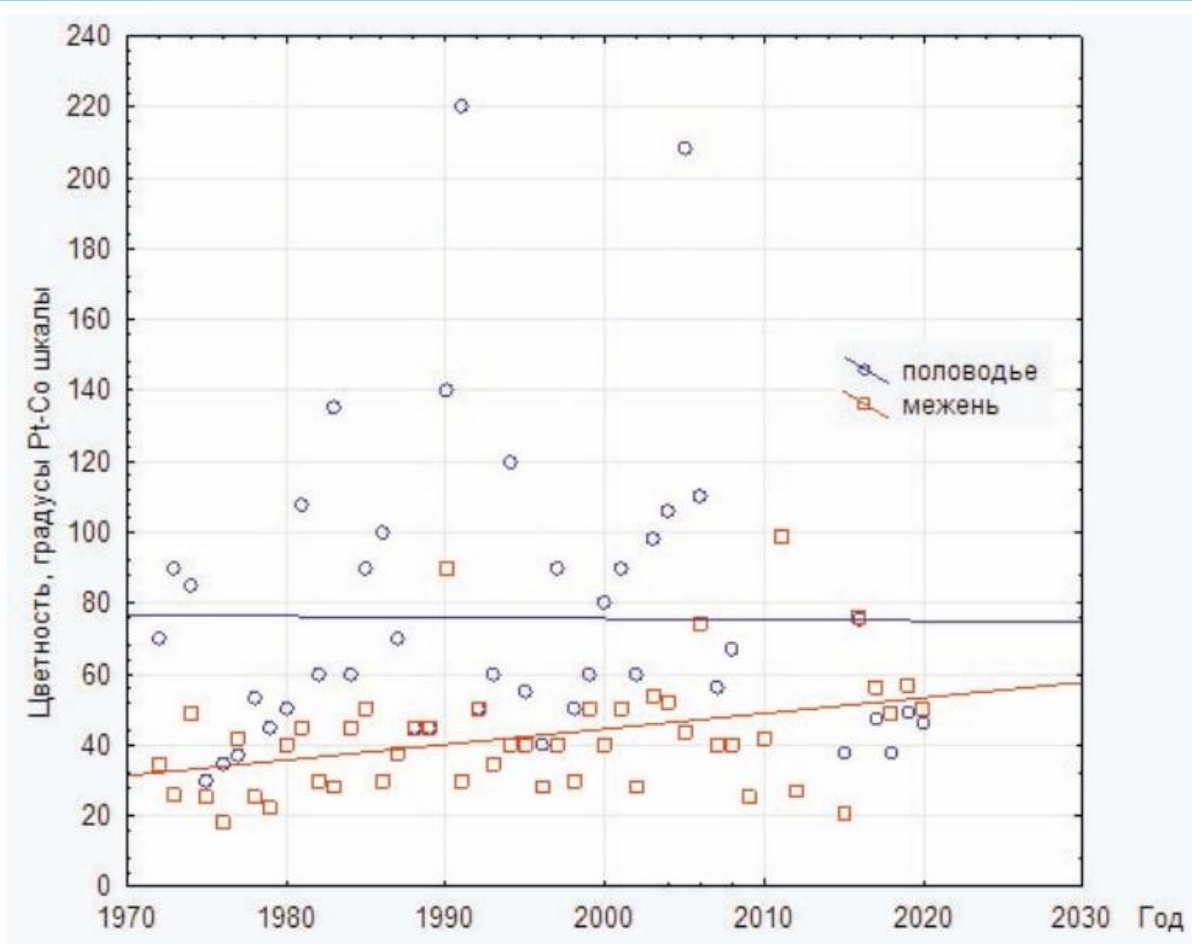


Рисунок 5 – Многолетняя динамика изменения величины цветности воды Шершневого водохранилища [20]

Органическое вещество природных вод является прекрасным носителем для многих загрязняющих веществ, включая тяжёлые металлы. Различные функциональные группы, присутствующие в составе органических веществ (фенольные, карбоксильные, кетоновые, аминные и т.д.), могут образовывать электростатические, вандер-ваальсовы и водородные связи. Подвергаясь биодegradации (особенно в условиях низкого содержания кислорода) органическое вещество выступает в качестве донора электронов для металлов в высших степенях окисления, переводя их в более миграционно подвижные формы. В следствии этого, органическое вещество является основным компонентом сложных окислительно-восстановительных реакций в водоёмах, особенно в донных отложениях и в придонной части поверхностных вод, характеризующихся низким уровнем содержания кислорода. Таким образом, при изучении

химико-экологического состояния водных экосистем важной задачей является комплексное определение содержания в воде органического вещества и тяжёлых металлов. Для вод Шершнёвского водохранилища тяжёлые металлы, обладающие токсическим эффектом, выделяются как приоритетные загрязнители водоёма. Так, исследования качества вод в верховьях водохранилища показали, что р. Миасс обеспечивает внос в водохранилище большого количества железа, марганца, меди и цинка, формируя высокие концентрации этих элементов в водной массе.

Значительная часть растворённого марганца (от 40 до 77 %) в природных водах существует в формах комплексных соединений с органическими молекулами, особенно низкомолекулярными. Подобное комплексообразование стабилизирует накопление в воде ионов  $Mn^{2+}$ , препятствуя окислению элемента и его осаждению из водной среды, а также повышая подвижность при переходе в организм гидробионтов. Для вод Шершнёвского водохранилища, особенно в период половодья, отмечается превышение ПДК<sub>р-х</sub> по марганцу в 3–6 раз.

Органические соединения природных вод, особенно гуминовые кислоты, образуют устойчивые соединения с ионами железа. Органические формы железа плохо окисляются кислородом, что препятствует переносу металла в донные отложения. Для вод Шершнёвского водохранилища отмечаются превышения ПДК<sub>р-х</sub> по железу в 2,2–3,6 раз [12].

В природных водах большая часть (84–99%) растворённой меди в форме  $Cu^{2+}$  связана с органическими веществами, особенно с фульвокислотами. Связывание происходит через кислород- и азотсодержащими функциональные группы, приводя к образованию стабильных комплексов. Для вод Шершнёвского водохранилища в период половодья отмечается превышение ПДК<sub>р-х</sub> по меди в 2–8 раз.

Ионы цинка в водной среде связываются с органическим веществом через различные функциональные группы (карбоксильные, фенольные, амидные, амино- и тио-), в том числе, за счёт комплексообразования.

Подобное связывание контролирует подвижность цинка, его биодоступность и токсичность, а также перенос в донные отложения. В целом, для вод Шершнёвского водохранилища наблюдаются содержания соединений цинка в воде, превышающие значения ПДК<sub>р-х</sub> в 2,5–6 раз, но в отдельные годы для периода половодья отмечались 60-кратный превышения содержания данного элемента.

Также в отдельные годы для вод водохранилища отмечались 2–кратные превышения ПДК<sub>р-х</sub> по содержанию кобальта [37].

### 1.3 Методы определения показателей, характеризующих содержание органического вещества в воде

Перманганатная окисляемость воды — это показатель, отражающий количество органических и некоторых неорганических веществ, способных окисляться раствором перманганата калия в кислой среде при нагревании. Результат выражается в миллиграммах кислорода на литр воды, что соответствует количеству кислорода, необходимого для окисления этих веществ.

Наиболее распространённым и простым способом определения перманганатной окисляемости является метод Кубеля. В его основе лежит окислительная реакция между органическими и некоторыми неорганическими веществами в пробе воды и раствором перманганата калия точной концентрации (обычно 0,01 моль/л). Для создания кислой среды используется серная кислота. Полнота окисления достигается при кипячении раствора в течении 10 минут. После завершения реакции непрореагировавший перманганат калия восстанавливают, внося в систему щавелевую кислоту в количестве, эквивалентном начальному содержанию перманганата калия. Количество перманганата, прореагировавшего с растворёнными в воде органическими веществами, эквивалентное количеству кислорода, затраченного на его окисление, определяется

обратным титрованием избытка щавелевой кислоты раствором перманганата калия.

Метод Кубеля используется для анализа вод с содержанием хлорид-ионов не более 300 мг/л (хлориды мешают определению, вступая в реакцию с перманганатом и существенно завышая результаты анализа) и показателем окисляемости в диапазоне 0,5–10 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. При более высоких значениях окисляемости пробу предварительно разбавляют.

Перманганатная окисляемость характеризует содержание в воде легкоокисляемых органических соединений, таких как гуминовые и фульвокислоты, продукты растительного происхождения, а также некоторых неорганических веществ (например, соединений железа (II) и сероводорода). Для определения неорганических восстановителей, которые окисляются намного легче органических веществ, пробу титруют раствором перманганата до кипячения [39].

Метод Кубеля не обеспечивает полного окисления всей органики, поэтому для более точной и комплексной оценки загрязнения воды применяют бихроматный метод, или химическое потребление кислорода (ХПК), который отличается более высокой окислительной способностью и позволяет определять широкий спектр органических соединений, включая устойчивые к мягкому окислению вещества. По данному методу восстановители, растворённые в воде, окисляют при длительном кипячении (6–7 часов) в присутствии катализатора – нитрата серебра, с раствором дихромата калия точной концентрации, а избыток дихромата оттитровывают эквинормальным раствором соли Мора. Применением данного метода определяется до 90 % органических загрязнителей воды, поэтому он используется для анализа вод, особенно сточных, содержащих в своём составе трудно окисляемые органические восстановители.

Реже используют на практике метод йодатной окисляемости, основанный на окислении органического вещества йодатом калия в присутствии серной кислоты при кипячении в присутствии нитрата



серебра. Метод демонстрирует результаты, близкие к значениям ХПК, но используется реже по причине высокой стоимости реактивов [36].

Одним из наиболее точных и широко применяемых методов определения растворённого кислорода в воде является титриметрический метод Винклера. Он основан на реакции в водном растворе между солями  $Mn^{2+}$  и щёлочью с последующим окислением образующегося гидроксида марганца (II) до гидрата оксида марганца (IV). На данной стадии происходит фиксация растворённого в воде кислорода. В дальнейшем соединение марганца (IV) в кислой среде восстанавливается обратно до  $Mn(II)$  йодидом калия, при этом выделяется свободный йод, количество которого эквивалентно количеству растворённого в воде кислорода. Данное количество ( $мг/дм^3$ ) определяется титрованием раствором тиосульфата натрия в присутствии крахмала, как индикатора [39].

Данная методика регламентирована международными стандартами (ISO 5813, ASTM D888) и обеспечивает высокую точность измерений. Однако для получения достоверных результатов необходимо проводить фиксацию пробы непосредственно после отбора, что исключает изменение содержания кислорода вследствие химических или биохимических процессов. Хотя метод эффективен для анализа большинства типов пресных вод, его точность может снижаться при наличии в воде восстановителей (таких как сульфиды), а также при повышенных концентрациях соединений железа, нитритов или органики.

Данная методика базируется на строгих стехиометрических расчётах окислительно-восстановительных процессов, дополненных титриметрическим анализом, что обеспечивает прямое и точное количественное определение растворённого кислорода. Несмотря на высокую точность получаемых результатов, метод отличается значительной трудоёмкостью и требует особой тщательности при работе с пробами, поскольку чувствителен к нарушениям процедуры анализа и присутствию мешающих

компонентов. Так, отбор проб для определения необходим вести в промежуток времени до 12 часов дня.

Более современными и быстрыми для определения растворённого в воде кислорода являются электрохимические методы, основанные на использовании селективных датчиков двух основных типов: гальванические и полярографические (датчики Кларка). При определении молекулы кислорода из воды диффундируют через газопроницаемую мембрану (тефлоновую или полиэтиленовую) и достигают поверхности электрода. Здесь они участвуют в электрохимической реакции восстановления, в результате которой генерируется электрический ток, сила которого прямо пропорциональна концентрации растворённого кислорода в анализируемой среде. Благодаря оптимальному сочетанию скорости анализа, удобства эксплуатации и точности, электрохимические методы являются одними из наиболее популярных при оперативном определении содержания растворённого кислорода в различных типах водных сред [37].

Анализ биохимического потребления кислорода (БПК) – фундаментальный метод оценки степени загрязнения водных объектов органическими веществами, основанный на измерении количества растворённого кислорода, потребляемого аэробными микроорганизмами для окисления биоразлагаемой органики в стандартных условиях. Классический пятидневный тест (БПК<sub>5</sub>) при 20 °С имитирует естественные процессы самоочищения водоёмов, позволяя количественно оценить нагрузку на водную экосистему. Повышенные значения БПК свидетельствуют о значительном антропогенном воздействии – попадании в воду коммунально-бытовых стоков, промышленных сбросов или сельскохозяйственных стоков, что приводит к критическому снижению концентрации растворённого кислорода.

Методика анализа включает инкубацию проб в герметичных тёмных бутылках при строго контролируемой температуре 20 °С для исключения

влияния фотосинтеза, с последующим измерением дефицита кислорода после 5-суточной экспозиции. Полученные данные об изменении количества кислорода за данный промежуток времени позволяют количественно оценивать органическую нагрузку на водные объекты; контролировать эффективность работы очистных сооружений и идентифицировать источники загрязнения. Важнейшее преимущество БПК-теста – его экологическая актуальность, поскольку он учитывает именно ту фракцию загрязнений, которая реально влияет на кислородный режим водоёмов. Метод имеет ограничения, не учитывая устойчивые к биодegradации соединения. Его выполнение требует строгого соблюдения стандартизированных условий проведения для получения сопоставимых результатов. В комплексной оценке качества вод БПК-анализ дополняется другими показателями, оставаясь незаменимым инструментом экологического мониторинга [40].

Мутность воды — это показатель, характеризующий степень помутнения воды, обусловленного наличием взвешенных частиц, которые рассеивают и поглощают свет, снижая прозрачность воды.

Для оперативной оценки мутности (прозрачности) воды применяются два простых визуальных метода. Диск Секки (20–30 см в диаметре) погружают в водоём до исчезновения из виду – полученная глубина видимости обратно пропорциональна мутности.

Другой метод основан на использовании прозрачной градуированной трубки, которую заполняют исследуемой водой и постепенно сливают до появления видимости маркера на дне, после чего по высоте оставшегося водного столба определяют мутность. Оба метода основаны на оценке светорассеяния взвешенными частицами и отличаются простотой исполнения, доступностью оборудования и возможностью проведения измерений непосредственно на месте. Методы имеют существенные ограничения такие как: субъективность визуальной оценки, зависимость результатов от внешних условий (освещение, цветность воды) и

относительно невысокую точность по сравнению с инструментальными методами.

Современные оптические методы определения мутности (нефелометрия, турбидиметрия) обеспечивают высокоточные количественные измерения за счёт автоматизированной регистрации светового потока с последующей цифровой обработкой данных [40].

Простой метод определения цветности предполагает визуальное сравнение интенсивности цвета исследуемой пробы воды с эталонными растворами, приготовленными по платиново-кобальтовой или хромово-кобальтовой (менее точный) шкале цветности. Метод базируется на субъективном восприятии цвета человеческим глазом, а результаты выражаются в градусах цветности (по шкале Pt–Co). Его применяют для предварительной оценки цветности природных и питьевых вод, не содержащих интенсивных окрашивающих примесей. Для определения истинного цвета пробу предварительно фильтруют через мембранный фильтр (0,45 мкм), чтобы устранить влияние взвешенных частиц. Метод имеет недостатки: зависимость от освещения и индивидуальных особенностей зрения оператора, в следствие чего снижает точность измерений.

Более точным методом определения цветности является фотометрический анализ, основанный на объединении законов Бугера и Ламберта-Бера, согласно которому интенсивность поглощения света пропорциональна концентрации окрашивающих веществ. В основе метода лежит построение графической зависимости «цветность – оптическая плотность (светопоглощение)» при измерении оптической плотности стандартных растворов хромово-кобальтовой или платиново-кобальтовой шкалы. Дальнейшее измерение оптической плотности исследуемого раствора позволяет установить по графику значение, выражаемое в градусах цветности. Данный метод обеспечивает высокую точность и

возможность автоматизации, он применим для анализа природных, питьевых и сточных вод [40].

### Выводы по первой главе

Шершнёвское водохранилище, являясь ключевым источником питьевого водоснабжения Челябинска, испытывает значительное антропогенное воздействие, приводящее к значительному ухудшению его экологического состояния. Наиболее острыми проблемами водоёма стали процессы эвтрофикации, вызванные поступлением биогенных элементов (азота и фосфора) из коммунальных и сельскохозяйственных стоков. Это провоцирует массовое развитие цианобактерий («цветение» воды) и создаёт дефицит кислорода, особенно в придонных слоях.

Особую роль в экосистеме водохранилища играет органическое вещество, поступающее как из природных источников, так и с антропогенными стоками. Присутствие органического вещества, с одной стороны, способствует миграции тяжёлых металлов за счёт образования растворимых комплексов, а с другой стороны – участвует в их иммобилизации в донных отложениях в восстановительных условиях.

Литературный анализ многолетней динамики показателей качества воды Шершнёвского водохранилища выявил снижение перманганатной окисляемости при сохранении высоких значений ХПК, что свидетельствует о преобладании трудно окисляемых органических соединений. Колебания БПК<sub>5</sub> указывают на нестабильность биохимических процессов. Наблюдаются выраженные сезонные изменения кислородного режима: летнее перенасыщение воды кислородом сменяется его зимним дефицитом.

Современные изменения в структуре водосборной территории, связанные с урбанизацией, привели к сокращению поступления органических веществ с поверхностным стоком. Однако это компенсируется усилением влияния внутренних процессов, связанных с

жизнедеятельностью гидробионтов. Экосистема водохранилища находится в состоянии хронического антропогенного стресса, требующего реализации мониторинговых исследований и комплексных природоохранных мер.

## ГЛАВА 2. СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ МАСС ШЕРШНЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

### 2.1 Оценка общего гидрохимического состояния Шершневого водохранилища

Отбор проб воды для определения гидрохимических показателей проводился в осенний период (сентябрь 2024 г.). Отбор проводился в утренние часы. Метеорологические условия характеризовались ясной погодой с преобладанием кучевых облаков. Скорость ветра составляла 2–3 м/с (лёгкий бриз, по шкале Бофорта – 2 балла). Согласно данным гидрометеорологического центра, температура воздуха достигла +17°C.

Месторасположение Шершнёвского водохранилища и точки отбора проб с территории водоёма приведены в приложении 1, 2. Отбор вод проводился батометром с глубин 0,5 м; 4 м; и 8 м в пластиковые ёмкости, предварительно тщательно промытые дистиллированной водой и водой с места отбора.

На первом этапе определены гидрофизические показатели воды, связанные с содержанием органического вещества, либо участвующие в регуляции этого содержания (температура, цветность, прозрачность, электропроводность). Также определялись значения водородного показателя рН и величина содержания растворённого в воде кислорода.

Цветность – естественное свойство природной воды, обусловленное присутствием гуминовых веществ и комплексных соединений железа. Цветность воды может определяться свойствами и структурой дна водоёма, характером водной растительности, прилегающих к водоёму почв, наличием в водосборном бассейне болот и торфяников и др. Методика определения цветности описана в приложении 3.

Прозрачность (мутность) воды обусловлена содержанием взвешенных в воде мелкодисперсных примесей – нерастворимых или коллоидных частиц, преимущественно, органического происхождения.

Методика определения мутности и прозрачности воды описана в приложении 4, 5.

Температура является важной гидрологической характеристикой водоёма, показателем возможного теплового загрязнения. Температура воды оказывает важнейшее влияние на содержание растворённого в воде кислорода, протекание биохимических процессов (величину БПК), особенности синтеза, накопления и деструкции органического вещества. Методика определения температуры описана в приложении 6.

Значение водородного показателя связано с содержанием кислотных соединений, в том числе, органических кислот. Величина рН регулирует активность гидробионтов, участвующих в синтезе и трансформации органических веществ. Методика определения водородного показателя (рН) описана в приложении 7.

Концентрация растворённого кислорода отражает распределение в водоёме аэробных и анаэробных условий, играя ключевую роль в оценке его экологического и санитарного состояния, в том числе, в накоплении и трансформации водной органики. Содержание кислорода регулирует процесс самоочищения водоёмов, участвуя в процессах окисления органических веществ, в том числе, разложения отмерших организмов. Снижение концентрации растворённого кислорода свидетельствует о снижении интенсивности биологических процессов, о загрязнении водоёма биохимически интенсивно окисляющимися веществами (в первую очередь органическими). Методика определения растворённого кислорода описана в приложении 8.

В естественных условиях находящиеся в воде органические вещества разрушаются бактериями, претерпевая аэробное биохимическое окисление с затратами растворённого в воде кислорода. В водоёмах с большим содержанием органических веществ большая часть растворённого кислорода потребляется на биохимическое окисление, характеризуясь



высокими показателями БПК. Метод определения БПК в воде описан в приложении 9 [6].

Непосредственно на месте отбора определялись значения температуры, прозрачности, электропроводности и водородного показателя воды. Для определения содержания растворённого в воде кислорода и БПК пробы консервировались на местности, а определение показателей проводилось в химической лаборатории ЮУрГГПУ.

Результаты определения указанных показателей приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Гидрофизические показатели и содержание растворённого в воде кислорода в центральной зоне Шершнёвского водохранилища

Показатель	Глубинные горизонты		
	0,5 м	4м	8м
Температура, °С	16,2	15,4	15,0
Прозрачность по диску Секки, м	2,3	—	—
Электропроводность, мкСм/см	380	426	428
Минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	243	273	274
рН	8,2	7,7	8,0
Содержание кислорода в воде, мг/дм <sup>3</sup>	6,2	4,5	3,1
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	4,1	1,8	3,0

Температура воды Шершнёвского водохранилища на момент отбора проб соответствовала сезонному состоянию и достаточно хорошо прогревается по глубине.

Анализ полученных результатов показывает, что воды имеют достаточно высокую прозрачность, характерную для слабо эвтрофного водоёма.

Значения электропроводности воды стабильно возрастает до глубины 4 м, а затем рост практически останавливается. По величине минерализации, рассчитанной исходя из значений электропроводности (коэффициент пересчёта 0,64) воды по всей глубине до 8 м относятся к

пресным. На поверхности величина электропроводности характеризуется минимальными значениями, что может быть связано с разбавлением и перемешиванием с атмосферными осадками. Рост показателя по глубине может быть обусловлен миграцией и накоплением растворённых солей (карбонатов, сульфатов, хлоридов) и возможным разложением органики. По мере приближения к придонным слоям солевой состав стабилизируется.

По величине водородного показателя отмечается рост значений pH воды в поверхностном слое и на глубине 8 м. В поверхностных слоях и на глубине до 4 м вода относится к щелочной, в то время как в переходных слоях вода характеризуется как слабощелочная. Определённое подкисление воды в центральных слоях может быть вызвано миграцией органического вещества – продуктов фотосинтеза в верхнем слое и продуктов анаэробного разложения – в придонных слоях.

Для исследованных вод отмечен дефицит содержания растворённого кислорода. С ростом глубины содержание этого показателя закономерно снижается, что связано с интенсивностью фотосинтеза и накопления органического вещества в поверхностном слое и повышением интенсивности разложения органики по глубине. Но даже в поверхностном слое для вод Шершнёвского водохранилища степень насыщения воды кислородом составляет лишь 63,5 %, хотя значения показателя соответствуют нормативам. По величине БПК<sub>5</sub> вода характеризуется как чистая, но установленные значения для верхнего слоя свидетельствуют о высокой биохимической активности потребления кислорода по отношению к органическому веществу, а в придонных слоях практически весь кислород расходуется на процессы разложения органического вещества.

На втором этапе работы определены отдельные показатели, характеризующие гидрохимическое состояние Шершнёвского водохранилища, выступающие в качестве факторов синтеза, аккумуляции и разложения органического вещества. Результаты, определённые в ходе анализа, приведены в сводной таблице 5. В таблице выделены показатели,

значение которых превышает величины ПДК для вод водоёмов хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Таблица 5 – Гидрохимические показатели воды Шершнёвского водохранилища

Показатель	Концентрация вещества, мг/дм <sup>3</sup>	
	0,5 м	8м
Азот аммония	<b>0,94</b>	<b>1,09</b>
Азот нитритов	0,002	0,002
Азот нитратов	0,045	0,049
Фосфор общий	0,021	0,052
рН	7,97	7,74
Цветность, °цветности	<b>38</b>	<b>43</b>
Взвешенные вещества	4,5	5,3
Железо общее	0,04	0,05
Гидрокарбонаты	224,2	–
Сульфаты	51	–
Хлориды	14,2	–
Кальций	40,1	–
Магний	21,9	–
Медь	<b>0,0068</b>	<b>0,0062</b>
Цинк	<b>0,0567</b>	<b>0,0438</b>
Марганец	<b>0,011</b>	<b>0,044</b>
Свинец	0,0032	0,0028
Кадмий	0	0
Никель	<b>0,011</b>	<b>0,014</b>
Перманганатная окисляемость	<b>8,3</b>	<b>8,7</b>
ХПК	14,8	<b>19,2</b>

По результатам проведённого анализа отмечено загрязнение вод соединениями аммонийного азота. Данный компонент может выступать в качестве продукта распада органических веществ. Об этом может свидетельствовать и факт низкого содержания других форм азота, в том

числе, нитратной формы. При разложении органического вещества образуется аммиак и соединения аммония, которые накапливаются в условиях невысокого содержания кислорода. Наибольшим содержанием аммонийного азота характеризуются придонные слои, в которых условия кислородного режима приближаются к анаэробным.

Кроме того, существенный вклад в загрязнение аммонийным азотом, образующимся при разложении органического вещества, могут вносить недостаточно очищенные коммунально-бытовые сточные воды прилегающих к водоёму населённых пунктов и поступление сельскохозяйственных стоков с прилегающих территорий, содержащих азотные удобрения и органику животноводческих комплексов. Комплексное воздействие антропогенных и природных факторов приводит к устойчивому превышению нормативов по аммонийному азоту в Шершнёвском водохранилище [17].

О превышении содержания органического вещества могут свидетельствовать показатели перманганатной окисляемости воды, которые в 1,5 раз выше рекомендованных нормативных значений. При этом, данный показатель характеризуется практически одинаковыми значениями как в поверхностных слоях, так и в придонных, что может свидетельствовать об относительно равномерном распределении легко окисляемой органики по толще воды.

По мере возрастания глубины происходит незначительное возрастание величины ХПК от 14,8 мг/дм<sup>3</sup> до 19,2 мг/дм<sup>3</sup>, что свидетельствует о достаточно равномерном распределении трудно окисляемых органических веществ. Незначительное (в 1,3 раза) увеличение концентрации органических веществ в придонных слоях свидетельствует о протекании в них анаэробных процессов разложения. При этом, в придонных слоях показатель ХПК начинает превышать нормативные значения. Этот факт соотносится с литературными данными, согласно которым многолетние тенденции эвтрофикации водоёма могут быть

связаны с миграцией органического вещества из накопленных донных отложений.

О повышенном содержании органических веществ в исследуемой воде может свидетельствовать и превышение показателя цветности, который в поверхностных слоях в 2 раза, а в придонных – в 2,2 раза превышает нормативные значения.

В литературном обзоре указывалось о взаимосвязи миграционных процессов с участием тяжёлых металлов и содержанием органического вещества в воде. Для исследованных вод установлено превышение ПДК по содержанию меди (в 6,2–6,8 раз) и по содержанию цинка (в 4,3–5,8 раз). При этом, для данных элементов большими концентрациями характеризуются поверхностные воды по сравнению с придонными, что может свидетельствовать о вкладе органических веществ в процесс комплексообразования с металлами, приводящий к их переходу в более водорастворимые формы.

В то же время, если в поверхностных слоях концентрация марганца находится на уровне ПДК (превышение в 1,1 раз), то в придонных слоях его концентрация превышает нормативные значения в 4,4 раза. Данный факт может быть связан с ролью рН: щелочная среда способствует осаждению марганца в форме нерастворимых соединений. В то же время, наличие большого количества органического вещества в придонных слоях может способствовать обратному переходу марганца в водорастворимую форму и концентрированию соединений марганца в придонной воде.

Также на уровне ПДК (превышение в 1,1 раз в поверхностных водах и в 1,4 раза – в придонных) находится содержание в исследуемой воде соединений никеля, что также может быть вызвано комплексообразующим вкладом органического вещества.

По результатам выполненных анализов были выбраны элементы для расчёта ИЗВ для определения качества воды на горизонтах 0,5 м и 8 м. ИЗВ определялся для 6 показателей: цветность, содержание меди, цинка и

марганца, а также БПК<sub>5</sub> и содержание растворённого в воде кислорода, как обязательных компонентов определения. Расчёт выполнялся согласно общепринятому способу расчёта по формуле (1) [2].

$$\text{ИЗВ} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}\right)}{6} \quad (1)$$

где n – строго лимитируемое количество показателей, берущихся для расчёта, имеющих наибольшее значение, независимо от того, превышают они ПДК или нет, включая показатель растворённого кислорода и БПК<sub>5</sub>;

C<sub>i</sub> – концентрация i-го загрязняющего вещества в воде;

ПДК<sub>i</sub>— предельно допустимая концентрация вещества в воде, мг/л.

Для величины содержания растворённого кислорода отнесение к норме приводилось согласно величине, приведённой в таблице 6.

Таблица 6 – Отнесение величины содержания растворённого в воде кислорода к нормативу при расчёте ИЗВ [9]

Содержание растворённого O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Норматив, мгO <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Свыше 6	6
6–5	12
5–4	20
4–3	30
3–2	40
2–1	50
1–0	60

Для величины БПК<sub>5</sub> отнесение к норме приводилось согласно величине, приведённой в таблице 7.

Чем выше значение БПК<sub>5</sub>, тем ниже присваиваемый норматив, что отражает увеличение уровня загрязнения воды органическими веществами. Например, при БПК<sub>5</sub> = 10 мг/дм<sup>3</sup> воде присваивается норматив 2 мгO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, а при БПК<sub>5</sub> = 20 мг/дм<sup>3</sup> — уже 1 мгO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>

Таблица 7 – Отнесение величины БПК<sub>5</sub> в воде к нормативу при расчёте ИЗВ [8]

БПК <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Норматив, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Ниже 3	3
3–15	2
выше 15	1

Результаты расчётов отнесений рассматриваемых величин в исследуемой воде к нормативам приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Расчёты  $C_i / ПДК_i$  для водных горизонтов 0,5 м и 8 м

Показатель	Горизонт		$C_i / ПДК_i$ 0,5м	$C_i / ПДК_i$ 8м
	0,5м	8м		
Цветность	38	43	1,9	2,2
Медь	0,0068	0,0062	6,8	6,2
Цинк	0,0567	0,0438	5,7	4,4
Марганец	0,011	0,044	1,1	4,4
Растворённый О <sub>2</sub>	6	30	0,5	5,0
БПК <sub>5</sub>	4,1	3,0	2,1	1,5

$$ИЗВ_{0,5м} = \frac{1,9 + 6,8 + 5,7 + 1,1 + 0,5 + 2,1}{6} = 3,0$$

$$ИЗВ_{8м} = \frac{2,2 + 6,2 + 4,4 + 4,4 + 5,0 + 1,5}{6} = 3,95$$

Для оценки класса качества воды по величине ИЗВ использовали данные, приведённые в таблице 9.

Данная шкала позволяет наглядно интерпретировать уровень антропогенной нагрузки: значения ИЗВ до 1 соответствуют условно чистым водам, а превышение порога 4 указывает на серьёзное загрязнение, потенциально опасное для экосистем и здоровья человека.

Таблица 9 – Оценка класса качества воды по ИЗВ [2]

Класс качества воды	Текстовое описание	Величина ИЗВ
1	Очень чистая	До 0,3
2	Чистая	Более 0,3 До 1
3	Умеренно загрязненная	Более 1 до 2,5
4	Загрязненная	Более 2,5 до 4
5	Грязная	Более 4 до 6
6	Очень грязная	Более 6 до 10
7	Чрезвычайно грязная	Более 10

Таким образом, по показателю ИЗВ как поверхностная, так и придонная вода Шершнёвского водохранилища относится к 4 классу – загрязненная, при этом, придонные воды максимально приближаются к 5 классу – грязные.

Также с помощью желонки (специальный инструмент для отбора проб донных отложений) отобраны поверхностные слои донных отложений Шершнёвского водохранилища с глубины 10 м. В отобранных образцах определялось содержание тяжёлых металлов, во многом зависящее от содержания органического вещества, большое количество которого в донных отложениях обуславливает фиксацию поллютантов, что позволяет точнее оценить их потенциальную биодоступность и экологическую опасность. Также рассчитана величина отношения содержания тяжёлых металлов в донных отложениях  $C_{дн}$  по отношению к их концентрации в придонном слое воды  $C_{пв}$ . Результаты определения количественного содержания тяжёлых металлов в донных отложениях представлены в таблице 10. Сопоставление данных таблицы 10 с фоновыми значениями для региона поможет дифференцировать природные и антропогенные источники металлов, а также выявить приоритетные загрязнители, требующие контроля в рамках экологического мониторинга.



Таблица 10 – Количественное содержание тяжёлых металлов в донных отложениях Шершнёвского водохранилища [8]

Химический элемент	Содержание в донных отложениях, мг/кг	$C_{д.н.}/C_{пв}$	Кларк в верхней части коры, мг/кг
Mn	517	11750	530
Zn	272	6210	52
Ni	120	8571	19
Cu	57	9193	14
Pb	43,6	н/о	17
Cd	1,4	-	0,1

В результате исследований в донных отложениях Шершнёвского водохранилища для большинства определяемых тяжёлых металлов отмечены превышения концентрации относительно кларковых значений в верхней части литосферы. Также для всех металлов характерно существенное превышение содержания в донных отложениях по отношению к придонному слою водной массы. В условиях щелочной среды тяжёлые металлы образуют нерастворимые формы, что приводит к их переходу из водной среды в донные отложения. При этом, фиксации тяжёлых металлов и их накоплению способствует высокое содержание органического вещества в верхнем слое донных отложений. При этом, органические соединения цинка могут вновь переходить в водную среду, о чем говорит наименьшее значение отношения концентрации металла в донных отложениях к концентрации в воде.

## 2.2 Оценка органического вещества в водах Шершнёвского водохранилища

Проведённый анализ проб воды на глубинах 0,5 м и 8 м выявил существенные различия в содержании биогенных элементов, источником которых могут являться процессы разложения органических веществ, а также по значениям показателей, демонстрирующих содержание в воде органических веществ (Таблица 11).

Таблица 11 – Показатели содержания биогенных элементов и показателей содержания органических веществ в воде Шершнёвского водохранилища

Показатель	Содержание, мг/дм <sup>3</sup>	
	0,5 м	8м
Перманганатная окисляемость	8,3	8,7
ХПК	14,8	19,2
Растворённый O <sub>2</sub>	6	30
БПК <sub>5</sub>	4,1	3,0
Взвешенные вещества	4,5	5,3
Цветность, ° цветности	38	43
Азот аммония	<b>0,94</b>	<b>1,09</b>
Азот нитритов	0,002	0,002
Азот нитратов	0,045	0,049
Фосфор общий	0,021	0,052
pH, ед.pH	7,97	7,74

Анализ полученных результатов показывает, что распределение по глубине форм азота демонстрирует характерную стратификацию органического вещества. Так, содержание аммонийного азота увеличивается по глубине с 0,94 мг/дм<sup>3</sup> до 1,09 мг/дм<sup>3</sup>. Такие концентрации, превышающие ПДК для вод рыбохозяйственных водоёмов, указывают на интенсивные процессы аммонификации, особенно в придонных слоях, характеризующихся интенсивным разложением органического вещества. При этом, низкие содержания нитратных и нитритных форм свидетельствует о замедленных окислительных процессах, что также может быть связано с затратами кислорода на разложение органического вещества.

В придонных слоях по сравнению с поверхностными водами в 2,5 раза увеличивается концентрация общего фосфора, что может выступать в качестве демонстрации интенсификации процессов разложения органического вещества в придонных слоях. При превышении критических концентраций фосфора более 0,05 мг/дм<sup>3</sup> происходит резкая

активизация эвтрофикационных процессов – «старение» водоёма ускоренными темпами. Органическое вещество выступает в этом процессе как катализатор и дополнительный загрязняющий фактор.

На первом этапе избыток фосфора вызывает неконтролируемое размножение фитопланктона, приводящее к «цветению» воды. Особенно опасно массовое развитие цианобактерий (сине-зелёных водорослей), многие виды которых выделяют органические токсины, опасные для гидробионтов и человека. Одновременно накапливающееся органическое вещество создаёт повышенную нагрузку на кислородный режим водоёма. В процессе его разложения микроорганизмы потребляют растворённый кислород, что приводит к гипоксии и заморам рыбы.

Осенью в Шершнёвском водохранилище наблюдается комплексная динамика физико-химических показателей, включающая взаимодействие ХПК ( $14,8\text{--}19,2$  мг  $\text{O}_2/\text{дм}^3$ ), растворённого кислорода ( $6\text{--}30$  мг/ $\text{дм}^3$ ) и уровня рН ( $8,2$  на поверхности и  $8,0$  на глубине). В поверхностном слое ( $0,5$  м) слабощелочная реакция среды (рН  $8,2$ ) способствует поддержанию относительно высокого содержания кислорода ( $6\text{--}10$  мг/ $\text{дм}^3$ ), особенно в периоды солнечной активности, когда фотосинтез водорослей усиливает его продукцию. Однако повышенные значения ХПК ( $15\text{--}20$  мг $\text{O}_2/\text{дм}^3$ ) указывают на значительную органическую нагрузку, что в сочетании с сезонным похолоданием замедляет процессы самоочищения.

В придонных горизонтах ( $8$  м) отмечается незначительное снижение рН до  $8,0$ , что характерно для глубинных водных слоёв. Это связано с накоплением продуктов анаэробного разложения органики и углекислого газа. Сочетание слабощелочной реакции среды (рН  $8,0\text{--}8,2$ ) с повышенным ХПК и колебаниями кислородного режима указывает на напряжённое состояние экосистемы водохранилища в осенний период. На глубине  $8$  метров, где зафиксировано увеличение ХПК до  $19,2$  мг $\text{O}_2/\text{дм}^3$ , могут формироваться зоны полного аноксидного состояния.

Для вод Шершнёвского водохранилища по глубине наблюдается незначительный рост величины перманганатной окисляемости от 8,3 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> до 8,7 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, вызванной наличием легко окисляемых органических веществ, что соответствует III классу качества воды («загрязненная»). Одновременно с этим происходит более существенный рост значений ХПК (с 14,8 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> до 19,2 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>), обусловленный возрастанием содержания тяжело окисляемой органики. Такой рост свидетельствует о протекании в нижних слоях деструктивных процессов, обуславливающих накопление органического вещества, в условиях недостатка кислорода, преимущественно тяжело окисляемого.

В определённой степени повышение ХПК может быть связано с естественными процессами – разложением водной растительности, поступлением органического вещества из заболоченных участков водосбора, массовым отмиранием гидробионтов. Однако, в большинстве случаев, природные факторы лишь усугубляют последствия антропогенного воздействия. Например, эвтрофикация водоёма, вызванная поступлением биогенных элементов со стоками, приводит к усиленному развитию водорослей, которые затем отмирают и увеличивают ХПК.

Интенсивное земледелие и животноводство вносят существенный вклад в органическое загрязнение водоёмов. Смыв с полей удобрений и пестицидов, попадание в водоёмы навоза и помета приводят к поступлению большого количества азот- и фосфорсодержащих соединений. Эти вещества стимулируют бурное развитие фитопланктона, который, отмирая, становится источником органического вещества. Особенно опасен выпас скота в водоохраных зонах, когда экскременты животных напрямую попадают в воду.

Особую опасность представляет синергетический эффект взаимодействия фосфора и органики. Разлагающаяся биомасса водорослей становится дополнительным источником органического вещества, которое, осаждаясь на дно, активизирует процессы высвобождения фосфора из

донных отложений. Этот цикл приводит к самоподдерживающемуся процессу эвтрофикации даже после прекращения внешнего загрязнения. В долгосрочной перспективе это вызывает необратимые изменения экосистемы – исчезновение кислородолюбивых видов, изменение трофических цепей, появление сероводородного заражения.

#### Выводы по второй главе

Проведённое исследование выявило значительное антропогенное воздействие на экологическое состояние Шершневого водохранилища, проявляющееся в комплексном загрязнении органическими веществами, биогенными элементами и тяжёлыми металлами. Наиболее критичными являются нарушения кислородного режима: на глубине 8 м зафиксирован дефицит растворённого кислорода ( $3,1 \text{ мг/дм}^3$ , 30% насыщения), что создаёт неблагоприятные условия для гидробионтов и свидетельствует о процессах анаэробного разложения органики.

Показатели органического загрязнения демонстрируют устойчивое превышение нормативов – значение ХПК в диапазоне  $14,8\text{--}19,2 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$  (при ПДК  $15 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ ), а перманганатной окисляемости  $8,3\text{--}8,7 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ , что соответствует III классу качества воды («загрязненная»). По глубине значения показателей, демонстрирующих содержание органического вещества, возрастает, что свидетельствует об интенсивных процессах анаэробного разложения в придонных слоях.

Концентрация биогенных элементов, особенно аммонийного азота ( $0,94\text{--}1,09 \text{ мг/дм}^3$ ) превышает ПДК в 1,8–2,2 раза, а общий фосфор на глубине 8 м достигает  $0,052 \text{ мг/дм}^3$ , что создаёт риск интенсивной эвтрофикации.

Анализ содержания тяжёлых металлов выявил превышение ПДК в поверхностных слоях по цинку (в 4,3–5,8 раз) и меди (в 6,2–6,8 раз). В придонных слоях существенно возрастает роль марганца, концентрация которого в 4,4 раза превышает ПДК. Подобное распределение может

свидетельствовать о вкладе органических веществ в процесс комплексообразования с металлами, приводящий к их переходу в более водорастворимые формы, а также переносе вещества из донных отложений в придонные слои.

Расчёт индекса загрязнённости воды (ИЗВ) показал ухудшение качества от 3,0 на глубине 0,5 м до 3,95 в придонных слоях, что соответствует 4 классу – загрязненная вода, при этом, придонные воды максимально приближаются к 5 классу – грязные.

Для донных отложений Шершнёвского водохранилища отмечено превышение концентрации тяжёлых металлов относительно кларковых значений в верхней части литосферы и существенное превышение содержания в донных отложениях по отношению к придонному слою водной массы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённой работы выполнен литературный анализ динамики изменения гидрохимических показателей Шершнёвского водохранилища, проанализирована информация об экологическом статусе водоёма на современном этапе его развития.

В рамках исследования осуществлён отбор проб воды Шершнёвского водохранилища с глубины 0,5 м, 4 м и 8 м и проведено определение гидрохимических показателей, характеризующих количественное содержание в воде органического вещества: прозрачность, рН, цветность, содержание растворённого кислорода, БПК<sub>5</sub>, ХПК, перманганатная окисляемость. Также проведён количественный анализ показателей, связанных с содержанием органического вещества: электропроводность (минерализация), содержание аммонийной, нитритной и нитратной форм азота, содержание фосфатов.

Проведено количественное определение содержания в воде тяжёлых металлов, как поллютантов, миграция и накопление которых в водной среде контролируется содержанием органического вещества. По результатам анализа выполнен расчёт ИЗВ для поверхностных и придонных вод Шершнёвского водохранилища.

Осуществлён отбор проб верхних слоёв донных отложений Шершнёвского водохранилища и определено количественное содержание тяжёлых металлов, накопление которых обусловлено связыванием органическим веществом.

По результатам выполнения исследований можно сделать ряд выводов.

1. Анализ литературных данных многолетней динамики гидрохимического состояния Шершнёвское водохранилище позволяет сделать выводы о том, что водоём испытывает антропогенное воздействие, приводящее к ухудшению его экологического состояния. С момента

начала функционирования до современного этапа происходит снижение в воде содержания легко окисляемых органических веществ, но рост вклада в загрязнение трудно окисляемой органики. Накопление органического вещества приводит к снижению содержания растворённого в воде кислорода и росту показателя БПК<sub>5</sub>. Присутствие органического вещества способствует накоплению в водной массе соединений меди, железа и марганца, выступающих в качестве приоритетных загрязнителей экосистемы водохранилища. Разложение органического вещества приводит к росту вклада в загрязнение биогенных элементов, к проблеме эвтрофикации и «цветения» водоёма.

2. Результаты проведённого гидрохимического анализа Шершнёвского водохранилища показали, что водоём характеризуется невысоким содержанием кислорода в поверхностном слое и дефицитом содержания в придонных слоях, что может быть обусловлено повышенным содержанием органического вещества. Изменение величин БПК<sub>5</sub>, перманганатной окисляемости и ХПК позволяет отнести воду водоёма к загрязнённой, а рост данных показателей в придонном слое может свидетельствовать об интенсивных процессах анаэробного разложения, а также переносе органического вещества из донных отложений в воду.

Концентрация биогенных элементов, особенно аммонийного азота (0,94–1,09 мг/дм<sup>3</sup>) превышает ПДК в 1,8–2,2 раза, а общий фосфор на глубине 8 м достигает 0,052 мг/дм<sup>3</sup>, что создаёт риск интенсивной эвтрофикации.

3. Анализ содержания тяжёлых металлов выявил превышение ПДК в поверхностных слоях по цинку (в 4,3–5,8 раз) и меди (в 6,2–6,8 раз). В придонных слоях существенно возрастает роль марганца. Подобное распределение может свидетельствовать о вкладе органических веществ в процесс комплексообразования с металлами, приводящий к их переходу в более водорастворимые формы, а также переносе вещества из донных



отложений в придонные слои. Расчёт ИЗВ подтвердил отнесение воды к загрязненной, характеризующейся ухудшением качества по глубине.

4. Для донных отложений Шершнёвского водохранилища отмечено превышение концентрации тяжёлых металлов относительно кларковых значений в верхней части литосферы и существенное превышение содержания в донных отложениях по отношению к придонному слою водной массы, что может быть обусловлено как осаждением в условиях щелочной среды, так и связыванием металлов органическим веществом донных отложений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов А. В. Тяжёлые металлы в водоёмах: источники и пути поступления / А. В. Баранов – Москва : Наука, 2020. – 320 с.
2. Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озёрных экосистемах / Н. А. Белкина // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 3. – С. 45-56. – DOI: 10.31857/.
3. Вишневецкий В. Ю. Влияние экологических факторов среды обитания на здоровье населения. / В. Ю. Вишневецкий, Ю. М. Вишневецкий // Известия ТРТУ. Тематический выпуск «Экология 2004. – море и человек». – Таганрог. – 2004. – С. 164–168.
4. Грибовский Г. П. Биогеохимические провинции Урала и проблемы техногенеза / Г. П. Грибовский, Ю. Г. Грибовский // Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы. – Москва : Наука, 2003. – С. 174–187.
5. Григорьев Н. А. О кларковом содержании химических элементов в верхней части континентальной коры / Н. А. Григорьев // Литосфера. – 2002. – № 1. – С. 61–71.
6. Гидрохимический анализ : учеб. пособие / А. В. Порфирьева, Г. К. Зиятдинова, Э. П. Медянцева [и др.]. – Казань : Изд-во Казанского университета, 2018. – 88 с.
7. Данные гидромониторинга Челябинской области // Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [сайт]. – URL: <http://chelpogoda.ru/> (дата обращения: 08.05.2025).
8. Добровольский В. В. Глобальная биохимия свинца // Свинец в окружающей среде / В. В. Добровольский, А. И. Обухов. – Москва : Наука, 1987. – С. 7–19.

9. Добровольский В. В. Основные черты геохимии цинка и кадмия / В. В. Добровольский // Цинк и кадмий в окружающей среде. – Москва : Наука, 1992. – С. 7–18.
10. Иванов В. П. Общая и медицинская экология : учебник / В. П. Иванов, О. В. Васильева, под общ. ред. В. П. Иванова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. – 508 с.
11. Инвентаризация и ранжирование источников загрязнения Шершнёвского водохранилища / Н. И. Ходоровская, В. С. Сперанский, Н. М. Цейзер [и др.] // Вестник Челябинского государственного университета. – 2008. – № 4 (105). – С. 126–128.
12. Качество питьевой воды как фактор риска здоровью населения / Т. В. Бадаева, М. П. Грачева, Ю. П. Тихомиров [и др.] // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2011. – Часть 2. – №3. – С. 438.
13. Козаренко А. Е. Свинец в растениях / А. Е. Козаренко // Свинец в окружающей среде. – Москва : Наука, 1987. – С. 71–76.
14. Комплексная характеристика состояния Шершневского водохранилища (Россия, г. Челябинск) / А. В. Кравцова, Н. И. Ходоровская, Л. В. Дерябина // Научное обозрение. – 2023. – № 1. – С. 85–90.
15. Кузнецова Л. И. Влияние загрязняющих веществ на экосистему / Л. И. Кузнецова. – Москва : Изд-во МГУ, 2022. – 300 с.
16. Малышева О. В. Концентрация тяжёлых металлов в донных отложениях./ О. .В. Малышева. – Екатеринбург : УНЦ УрО РАН, 2021. – 220 с.
17. Некрасова Т. В. Экологические проблемы водоёмов России / Т. В. Некрасова. – Новосибирск : СО РАН, 2020. – 190 с.
18. Нойман Ш. Очистка питьевой воды от мышьяка селективными гибридными адсорбентами / Ш. Нойман // Вода: химия и экология. – 2010. – № 12. – С. 18–22.

19. Основы экогеологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем / В. В. Куриленко, О. В. Зайцева, Е. А. Новикова [и др.]; под ред. В. В. Криленко. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2004. – 448 с.

20. Особенности многолетней динамики развития гидрохимических показателей воды Шершневского водохранилища / А. В. Кравцова, Н. И. Ходоровская, В. А. Ячменев, В. В. Баженова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – № 5. – С. 8–28. – DOI: 10.35567/1999-4508-2021-5-1.

21. О состоянии окружающей среды Челябинской области в 2022 году : государственный доклад // Министерство экологии Челябинской области : [сайт]. – URL : [https://mineco.gov74.ru/files/upload/mineco/Доклад%20ЭС%202022%20\(1\).pdf](https://mineco.gov74.ru/files/upload/mineco/Доклад%20ЭС%202022%20(1).pdf) (дата обращения 12.05.2025).

22. Махов М. А. Отчёт депутата Законодательного Собрания Челябинской области/ М. А. Махов // Законодательное собрание Челябинской области [сайт]. – URL: <https://m.zs74.ru/sites/default/files/otchet-o-rabote-pered-izbiratelyami-za-2024-god.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).

23. Оценка экологического состояния Шершневского водохранилища в современных условиях / Н. И. Ходоровская, Л. В. Дерябина, С. В. Крайнева [и др.] // Вестник Челябинского государственного университета. – 2013. – № 7 (298). – С. 167–171.

24. Петров В. А. Тяжёлые металлы: химизирование, последствия и решения / В. А. Петров. – Москва : Экоцентр, 2019. – 240 с.

25. Реймерс Н. Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы)/ Н. Ф. Реймерс. – Москва : Россия молодая, 1994. – 367 с.

26. Современное состояние Шершневского водохранилища в условиях антропогенного эвтрофирования / Н. И. Ходоровская, Т. В. Еремкина, В. А. Антипова // Материалы IV Всероссийской конференции по водной экотоксикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». – Ч. 2. – Борок, 2011. – С. 177–181.

27. Формирование качества воды Шершневого водохранилища / Н. И. Ходоровская, Л. В. Дерябина, С. В. Крайнева [и др.] // Научный медицинский вестник – 2016. – № 4(6). – DOI: 10.17117/nm.2016.04.066.
28. Химический состав и качество воды Шершнёвского водохранилища в 2001–2009 годах / Д. Ю. Нохрин, Ю. Г. Грибовский, Н. А. Давыдова [и др.] // Вестник Челябинского государственного университета. – 2010. – № 8 (189). Экология. Природопользование. Вып. 4. – С. 67–71.
29. Цинк и кадмий в окружающей среде / В. А. Алексеенко, Л. В. Алешукин, Л. Е. Беспалько [и др.]. – Москва : Наука, 1992. – 199 с.
30. Шахов И. С. Водные ресурсы и их рациональное использование / И. С. Шахов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2000. – 256 с.
31. Шилов И. А. Экология / И. А. Шилов. – Москва : Высшая школа, 1997. – 512 с.
32. Abdur R. Miah. Technologies for Remediation of Heavy Metals in Environment and Ecosystem: A Critical Overview of Comparison Study / Miah R. Abdur, Md. Ashraful Alam // Asian Journal of Environment & Ecology. – 2024. – Vol. 23. – № 4. – P. 61–80. – DOI: 10.9734/AJEE/2024/v23i4540.
33. Edwards K. A. Water, environment and development – a global agenda / K. A. Edwards // Natural Resources Forum. – 1993. – Vol. 17. – № 1. – P. 59–64.
34. El Ati-Hellal M. Heavy Metals in the Environment and Health Impact / M. El Ati-Hellal, Faycal Hellal // Environmental Health. – 2021. – 14 p. – DOI: 10.5772/intechopen.97204.
35. Hossain M. Water pollution index – A new integrated approach to rank water quality / M. Hossain, P. K. Patra // Ecological Indicators. – 2020. – Vol. 117. – P. 106668.
36. Lohani M. B. Seasonal variations of heavy metal contamination in river Gomti of Lucknow city region / M. B. Lohani, A. Singh, D. C. Rupainwar,

D. N. Dhar // Environmental Monitoring and Assessment. – 2008. – Vol. 147. – P. 253–263.

37. Sarfraz H. Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight / H. Sarfraz, K. Maryam // Frontiers in Microbiology – 2022 – Vol. 13. – P. 1–14. –DOI:10.3389/fmicb.2022.900740

38. Shahin M. S. Thermodynamic analysis of parabolic trough and heliostat field solar collectors integrated with a Rankine cycle for cogeneration of electricity and heat / M. S. Shahin, M. F. Orhan, F. Uygul // Solar Energy. – 2016. – Vol. 136. – P. 183–196.

39. Smith J. R. Advanced Methods for Water Quality Assessment / J. R. Smith, K. L. Brown // Journal of Environmental Science. – 2023. – Vol. 45. – P. 112–125.

40. Tanaka Y. Heavy Metal Contamination in Urban Water Systems: A Global Review / Y. Tanaka, S. Watanabe // Water Research. – 2022. – Vol. 210. – P. 118–135.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Спутниковый снимок г. Челябинска

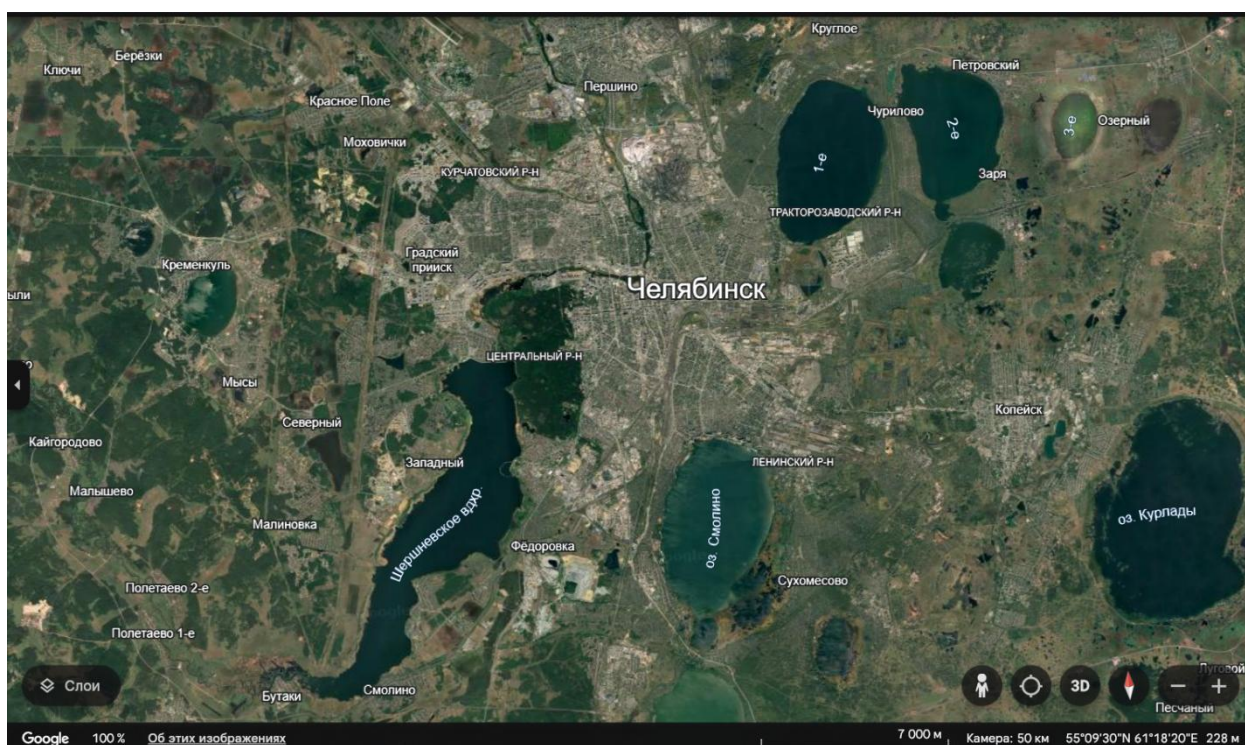


Рисунок 1.1 – Месторасположение Шершневского водохранилища на снимке г. Челябинска

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Спутниковый снимок берега Шершневого водохранилища

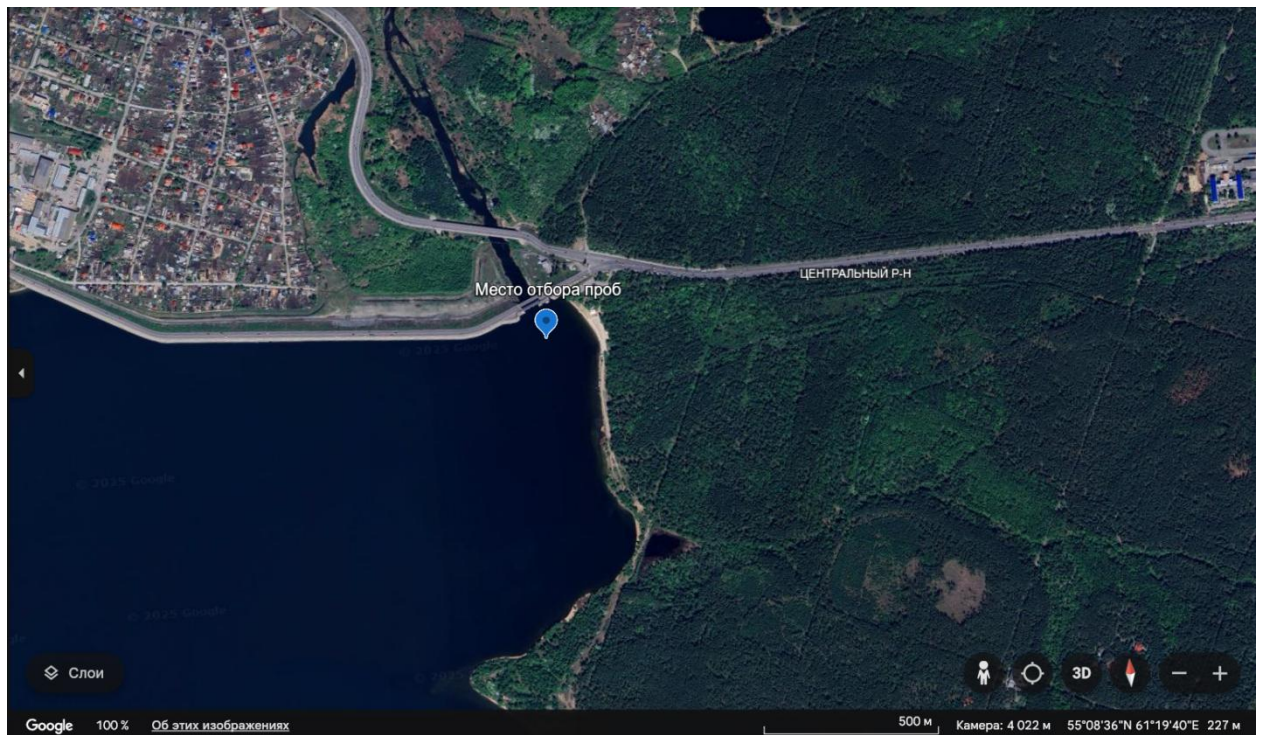


Рисунок 1.2 – Место отбора проб на Шершнёвском водохранилище



## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Методика определения цветности

Цветность воды определяют визуально или фотометрически сравнением окраски пробы с окраской условной 100–градусной шкалы цветности воды, которую готовят из смеси  $K_2Cr_2O_7$  и  $CoSO_4$ . Для воды поверхностных водоёмов допускается не более 20 градусов по шкале цветности. Если окраска воды не соответствует природному тону, а также при интенсивной естественной окраске, определяют высоту столба жидкости, при которой обнаруживается окраска, а также качественно характеризуют цвет воды. Соответствующая высота столба воды не должна превышать 20 см для вод водоёмов хозяйственно-питьевого назначения и 10 см для вод культурно-бытового назначения. Цветность можно определять качественно, характеризуя цвет воды в пробирке высотой 10–12 см (бесцветная, слабо-жёлтая, жёлтая, буроватая).

При определении цветности используют стандартный раствор хромово-кобальтовой шкалы, который готовят растворением отдельно в 50–100 см<sup>3</sup> дистиллированной воды 0,0875 г дихромата калия и 2,0000 г гептагидрата сульфата кобальта (II). Растворы смешивают, прибавляют 1,0 см<sup>3</sup> серной кислоты (плотность 1,84 г/см<sup>3</sup>), доводят объем дистиллированной водой до 1 дм<sup>3</sup>. Полученный раствор условно соответствует цветности 500<sup>0</sup>.

Для построения калибровочного графика в ряд мерных колб объемом 50 см<sup>3</sup> вносят аликвоты стандартного раствора хромово-кобальтовой шкалы, доводят объем до метки раствором серной кислоты. Для полученных растворов определяют значение оптической плотности по отношению к серной кислоте, строят градуировочный график зависимости «оптическая плотность – цветность». По графику после измерения соответствующей оптической плотности определяют значение цветности исследуемой воды [6].

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Методика определения прозрачности и мутности

Мутность определяют фотометрически (по ослаблению проходящего света (турбидиметрически) или по светорассеянию в отражённом свете (нефелометрически)), а также визуально (по степени мутности столба высотой 10–12 см в мутномерной пробирке). В последнем случае пробу описывают качественно следующим образом: прозрачная; слабо опалесцирующая; опалесцирующая; слабо мутная; мутная; очень мутная.

ГОСТ Р 57164-2016 описывает полевой метод определения мутности и прозрачности воды с использованием диска Секки – отлитого из бронзы (или другого металла с большим удельным весом) диска, покрытого белым пластиком или белой краской и прикрепленного к цепи (нерастягивающемуся шнуру, стержню и т.п.). Диск имеет диаметр 200 мм с шестью отверстиями, каждое диаметром 55 мм, расположенными по кругу диаметром 120 мм. При определении мутности с помощью диска его опускают в воду настолько, чтобы он был едва заметен. Измеряют максимальную длину погруженной цепи (шнура), при которой диск ещё заметен [6].

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### Инструмент для оценки мутности воды

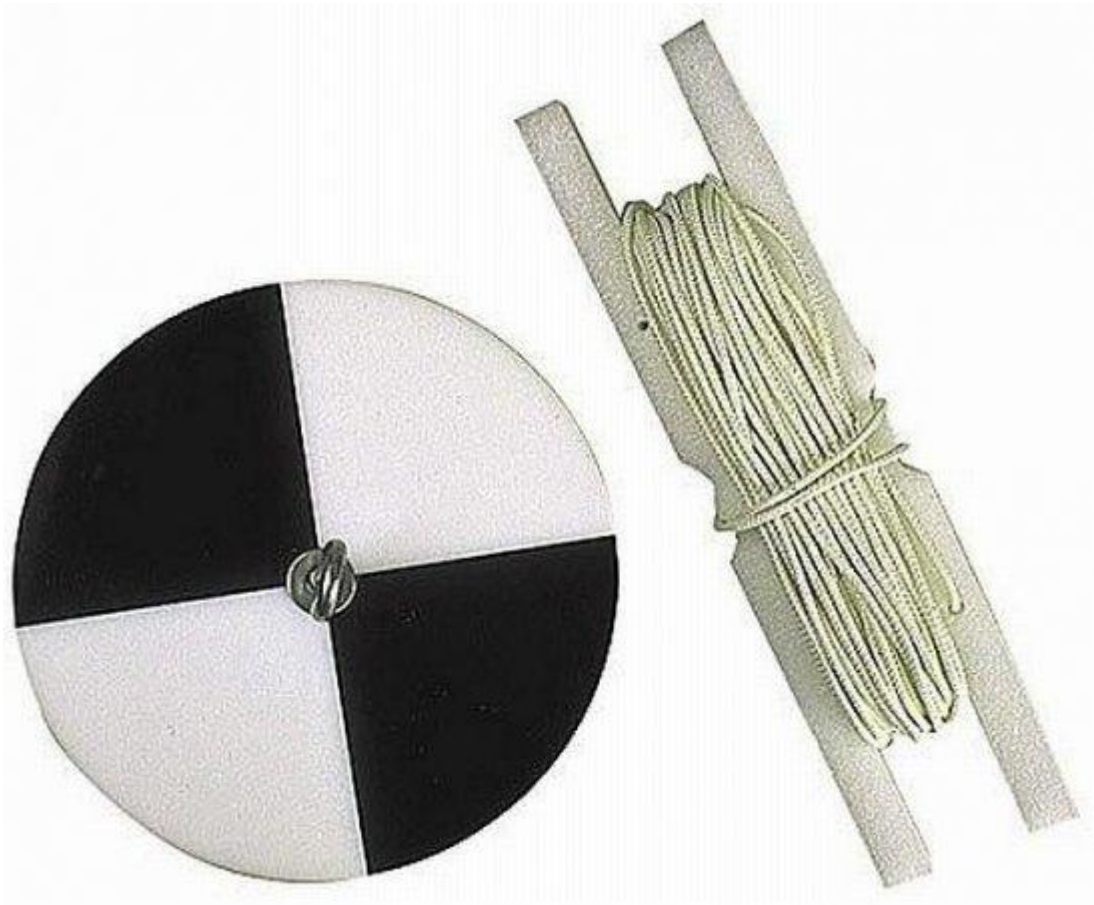


Рисунок 5.1 – Пример Диска Секки

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

### Методика определения температуры

Проводить измерение температуры следует в нескольких точках водоёма, отстоящих друг от друга на несколько сот метров: в месте, где ожидается тепловое загрязнение, и в контрольной точке (температурный фон). Необходимо учитывать, что в выбранных точках должны быть близкие физические и гидрологические условия: скорость течения, глубина, продуваемость, освещённость солнцем и др. Если изучается проточный водоём, то точка контроля должна быть выше по течению. Следует избегать измерения температуры в местах возможного естественного прогрева воды – на отмелях, в зарослях водных растений и т.п., так как в подобных местах температура обычно значительно превосходит общий температурный фон. Температура воды определяется непосредственно на водоёме калиброванным термометром с ценой деления 0.1–0.5 °С (в отдельных случаях оправдано измерение с ценой деления 1 °С). Термометр устанавливают в пробоотборнике, который размещают на выбранной глубине, и выдерживают на нужной глубине не менее 5–10 мин, после чего пробоотборник поднимают и, не вынимая термометр, сразу же определяют температуру. При глубоководных измерениях необходимо использовать пробоотборники опрокидывающегося типа, заполняемые водой на требуемой глубине. Температуру поверхностных слоёв определяют, опуская термометр на глубину 15–20 см. Температура в поверхностных слоях воды может значительно (на 3–5 °С и более) отличаться от температуры на глубинах в несколько метров. Предметом особого внимания должны быть впадающие в водоём реки, каналы и сточные канавы. При наличии впадающих в водоём притоков (сточных канав, ручьёв, рек) определите температуру также в зонах смешения воды в местах их впадения в водоём. При наличии разницы в измеренных температурах в несколько градусов ( $\geq 3$  °С) можно говорить о тепловом

загрязнении водоёма. Погрешность измерения температуры можно свести к минимуму, выполняя следующие правила:

- для измерений используют только калиброванный термометр (откалибровать термометр или проверить его точность можно, опустив его в тающий лёд ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и в кипящую воду ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ));

- измеряют температуру в разных точках одним и тем же термометром;

- результатом измерения считается среднее арифметическое нескольких наблюдений [6].

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

### Методика определения водородного показателя (рН)

Для определения рН используют рН-метрию и визуальную колориметрию. рН-метрия предполагает измерение водородного показателя с помощью стационарных (лабораторных) приборов – рН-метров, в то время как визуально-колориметрическое определение проводят с использованием портативных тест-комплектов, основанных на реакции универсального или комбинированного индикатора с водородными ионами, сопровождающейся изменением окраски раствора. Точность измерения водородного показателя с помощью рН-метра может быть высока (до 0.1 единиц рН и менее), с помощью визуально-колориметрических тест-комплектов – около 0.5 единиц рН. В некоторых случаях – для быстрого (сигнального) анализа неизвестных растворов – используется рН-индикаторная бумага, имеющая точность определения рН не более  $\pm 1$ , что недостаточно для выполнения анализа природной и питьевой воды [6].

## ПРИЛОЖЕНИЕ 8.

### Методика определения растворённого кислорода

Перед отбором пробы воды из водоёма измеряют и фиксируют атмосферное давление и температуру воды в водоёме. Отбирают 34 пробу воды в склянку с мешалкой, заполняя водой весь объем склянки. Склянку закрывают пробкой так, чтобы в склянке не осталось пузырьков воздуха. В склянку вводят разными пипетками 1 мл 2.5 М раствора соли марганца, затем 1 мл 15 % раствора иодида калия и 1–2 капли 10 % раствора сульфаминовой кислоты (если вода не содержит нитритов или их содержание менее 0.05 мг/л, то раствор сульфаминовой кислоты можно не добавлять), после чего склянку закрывают пробкой. Содержимое склянки перемешивают с помощью имеющейся внутри мешалки, держа склянку в руке. Образующемуся осадку дают отстояться не менее 10 мин. Склянку с фиксированной пробой можно хранить в затемнённом месте не более 1 суток. В склянку вносят пипеткой 2 мл раствора серной кислоты (1:2), погружая пипетку до осадка (не взмучивать!) и постепенно поднимая ее вверх по мере опорожнения. Склянку закрывают пробкой, и содержимое перемешивают до растворения осадка, затем содержимое склянки полностью переносят в коническую колбу для титрования. Бюретку заполняют раствором тиосульфата натрия и титруют пробу до слабо-жёлтой окраски. Затем добавляют пипеткой 1 мл 0.5 % раствора крахмала (раствор в колбе синее) и продолжают титрование до полного обесцвечивания раствора. Отмечают объем раствора тиосульфата натрия, израсходованный на титрование. Для определения степени насыщения воды кислородом определяют величину концентрации насыщенного раствора кислорода в воде ( $C_{\text{насыщ}}$ , мг/л), исходя из температуры воды, зафиксированной в момент отбора пробы [6]

## ПРИЛОЖЕНИЕ 9

### Методика определения БПК

В кислородные склянки с мешалками (не менее 3 шт.) отбирают пробы воды, заполняя водой весь объем склянки и закрывая пробкой 39 так, чтобы в склянке не осталось пузырьков воздуха. Для получения представительной пробы отбор проб воды проводится, по возможности, на удалении от берегов, дна, водных растений и т.п., которые могут быть источниками выделений в воду органических веществ и/или микроорганизмов. В первой склянке кислород сразу же фиксируют и определяют концентрацию РК. Две другие склянки – инкубационные – помещают в темноте в инкубатор через водяной затвор из чашки Петри, что предотвращает контакт воды в склянке с воздухом. По истечении 5 суток инкубации в склянках определяют концентрацию остаточного РК как среднее арифметическое результатов по каждой инкубационной склянке и рассчитывают значение БПК<sub>5</sub> в мг/л: (2) [6]

$$БПК_5 = C_1 - C_2 \quad (2)$$

где  $C_1$  – концентрация РК в первоначальной пробе, мг/л;

$C_2$  – средняя концентрация РК по истечению периода инкубации, мг/л.

Можно определять также БПК<sub>10</sub> (за 10 суток) и БПК<sub>полн</sub> (за 20 суток), при этом окисляется около 90 % и 99 % органических веществ соответственно [6].



## ПРИЛОЖЕНИЕ 10

### Заросли рдестов и перифитон Шершневого водохранилища



Рисунок 10.1 – Фотография с места отбора проб