

ЗНАЧЕНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ САМООЧИЩЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ (НА ПРИМЕРЕ ВИТЕБСКОЙ ОБЛАСТИ)

О.М. Балаева-Тихомирова, А.С. Володько, Н.С. Фомичёва, П.Ю. Пинчук
Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П.М. Машерова»

В статье представлены результаты оценки способности к самоочищению природных водоемов Витебской области, подверженных различному уровню техногенного воздействия.

Цель исследования – изучить влияние активных форм кислорода на процессы самоочищения воды природных водоемов Витебской области с различным уровнем техногенной нагрузки.

Материал и методы. *Пробы воды были отобраны в 5 природных водных экосистемах, расположенных в различных районах Витебской области. Исследования проводились весной – летом – осенью 2022 года. Способность к самоочищению водоемов оценивалась по содержанию и составу активных форм кислорода спектрофотометрическим методом, с учетом значений водородного показателя воды.*

Результаты и их обсуждение. *Выявлено, что значение pH в водных экосистемах Витебской области изменяется в пределах 6,06–7,68 и подвержено сезонным колебаниям. Водородный показатель влияет на активность свободных радикалов и процессы самоочищения водоема. В анаэробных условиях без доступа света в течение 60 дней эксперимента зафиксированы естественное уменьшение водородного показателя (10–30-й день) и дальнейшее увеличение и стабилизация на 40–50-й день. Установлено, что все изучаемые водоемы имеют сходную окислительную способность, а основным видом преобладающих активных форм кислорода является гидроксильный радикал.*

Заключение. *Таким образом, эффективность процесса самоочищения определяется способностью природных водных экосистем генерировать активные формы кислорода, которые участвуют в процессах пероксидного окисления.*

Ключевые слова: *природные водные экосистемы, водородный показатель, активные формы кислорода, процессы самоочищения воды.*

THE IMPORTANCE OF ACTIVE OXYGEN SPECIES FOR SELF-PURIFICATION PROCESSES OF NATURAL WATER BODIES (ON THE EXAMPLE OF VITEBSK REGION)

O.M. Balayeva-Tikhomirova, A.S. Volodko, N.S. Fomicheva, P.Yu. Pinchuk
Education Establishment "Vitebsk State P.M. Masherov University"

The article presents the results of assessing the self-purification ability of natural water bodies in Vitebsk Region, confirmed by various levels of technogenic impact.

The aim of the work is to study the influence of reactive oxygen species on the processes of self-purification of water from natural water bodies of Vitebsk Region with different levels of anthropogenic load.

Material and methods. *Water samples were taken from 5 natural aquatic ecosystems located in different areas of Vitebsk Region. The studies were carried out in the spring – summer – autumn of 2022. The ability to self-purify water bodies was assessed by the content and composition of reactive oxygen species using the spectrophotometric method, taking into account the pH value of the water.*

Findings and their discussion. *It was revealed that the pH value in aquatic ecosystems of Vitebsk Region varies within the range of 6,06–7,68 and is subject to seasonal fluctuations. The pH value affects the activity of free radicals and the processes of self-purification of the reservoir. Under anaerobic conditions without access to light, after 60 days of the experiment, a natural decrease in the pH value was recorded (10–30 days) and a further increase and stabilization on days 40–50. It was found out that all the studied reservoirs have a similar oxidizing capacity and the main type of predominant reactive oxygen species is the hydroxyl radical.*

Conclusion. *Thus, the efficiency of the self-purification process is determined by the ability of natural aquatic ecosystems to generate reactive oxygen species that participate in peroxide oxidation processes.*

Key words: *natural aquatic ecosystems, pH value, reactive oxygen species, water self-purification processes.*

В процессе функционирования водной экосистемы между ее компонентами осуществляется обмен веществом и энергией, который имеет циклический характер и подвергается трансформации. На данные изменения влияют физические, химические и биологические факторы и постепенное разложение и синтез веществ. В зависимости от интенсивности внешнего воздействия на водную экосистему и характера протекания процессов происходит или восстановление водной экосистемы до фоновых состояний (самоочищение), или водная экосистема переходит в другое устойчивое состояние, которое будет характеризоваться иными количественными и качественными показателями биотических и абиотических характеристик. Самоочищение природных водоемов становится возможным за счет поступающих из внешней среды веществ, которые включаются в происходящие процессы трансформации. При этом процессе вещества возвращаются в свой резервный фонд [1].

Изучение биотических процессов водных экосистем, их функционирование и самоочищение является весьма актуальным. Механизм самоочищения воды и поддержания водных параметров экосистемы относится к приоритетным проблемам экологии.

Процесс синтеза и разрушения пероксида водорода в водоемах непрерывен, поэтому природная вода относится к окислительно-восстановительным системам открытого типа. Данная система включает валентно-насыщенные микрообъекты (молекулы, ионы) и валентно-ненасыщенные свободные радикалы и ион-радикалы.

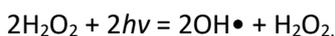
Самоочищение под действием вырабатываемых активных форм кислорода (АФК) является обязательной формой нормального экологического состояния водоема. АФК обладают окислительной активностью и инициируют реакции перекисного окисления в биологических и природных водных системах. Эффективность процессов самоочищения определяется балансом между скоростями накопления в среде восстановителей и окислителей, образующихся в процессе разложения пероксида водорода. Содержание восстановителей зависит от антропогенной нагрузки, экологических факторов среды и химического состава водоема. Поэтому на данные процессы будут влиять физико-химические характеристики воды: наличие высокомолекулярных соединений, коллоидных и взвешенных частиц, окислительно-восстановительные параметры (Eh, pH, [O]). При снижении прозрачности воды природного водоема в окислительных процессах фиксируется преобладание фазы каталитического распада пероксида водорода. Он поступает в водные экосистемы 4-мя путями: из атмосферы; в результате каталитических процессов окисления, протекающих с участием кислорода; фотохимических реакций под действием солнечного света; биологической эмиссии свободных радикалов. Процессы образования и разложения H_2O_2 в воде сопровождаются эффективной генерацией реакционноспособных частиц, участвующих в самоочищении водной среды, радикалов $\bullet OH$ и $O\bullet$, комплексов металлов в высоких степенях окисления [2].

Природная вода характеризуется колебаниями концентраций химически активных веществ, участвующих в реакциях самоочищения. Данные колебания связаны с систематическим воздействием факторов внешней среды, суточными изменениями показателей и нарушением химического равновесия. Природные водоемы являются сложными физико-химическими системами, находящимися в динамическом режиме, а также средой обитания живых организмов. Указанные особенности приводят к усложненному компонентному составу и физико-химическим параметрам, которые влияют на кинетические, динамические и метаболические процессы. Водные экосистемы поглощают газы из воздуха, минеральные соли и микроэлементы, продукты жизнедеятельности и распада живых организмов, а также техногенные загрязнения.

Цель работы – изучить влияние активных форм кислорода на процессы самоочищения природных водоемов Витебской области.

Материал и методы. Для характеристики водных экосистем использовали данные о стационарных концентрациях АФК. Эти значения применялись в работе для оценки влияния концентраций АФК на свободно-радикальные процессы и самоочищение природных водоемов. Для исследований учитывались следующие стационарные концентрации: пероксида водорода H_2O_2 – $10^{-5} \dots 10^{-17}$ моль/дм³, синглетного кислорода – $10^{-14} \dots 10^{-12}$ моль/дм³, гидроксидных радикалов ($\bullet OH$) – $10^{-18} \dots 10^{-15}$ моль/дм³, супероксидных ($O\bullet$) – $10^{-17} \dots 10^{-9}$ моль/дм³, алкилпероксидных (RO_2) – $10^{-11} \dots 10^{-8}$ моль/дм³ [3].

Пероксид водорода обладает невысокой реакционной способностью, но под влиянием УФ-лучей он распадается на АФК с высокой способностью к взаимодействию с другими веществами:



Оценка протекающих в природных экосистемах свободно-радикальных процессов основывалась на химических реакциях взаимодействия АФК и значениях их констант скоростей реакций (табл. 1) [4].

Таблица 1

Химические реакции АФК и значения их констант скоростей

| Реакции взаимодействия АФК | Константа скорости (k), дм ³ / моль *с |
|--|---|
| $\text{OH}\cdot + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$ | $5,5 \cdot 10^9$ |
| $\text{OH}\cdot + \text{HO}\cdot_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | $1,4 \cdot 10^{10}$ |
| $\text{OH}\cdot + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO}\cdot_2 + \text{H}_2\text{O}$ | $2,7 \cdot 10^7$ |
| $\text{HO}\cdot_2 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ | 3,7 |
| $\text{HO}\cdot_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ | $8,3 \cdot 10^5$ |

Для описания процессов, протекающих в исследуемых водоемах, оценивали окислительно-восстановительные превращения пероксида водорода естественного происхождения и присутствующих в водоемах металлов переменной валентности. Процесс самоочищения водоемов сопровождается разложением и синтезом органического вещества и сдвигом углекислотного равновесия, что приводит к изменению pH водной среды. Измерения pH осуществляли pH-метром И-130М при комнатной температуре [5]. Для установления изменения pH в анаэробных условиях без доступа света был проведен эксперимент, в котором в течение 60 дней пробы воды были помещены в холодильник. pH проб из каждого водоема измерялась в 1-й день эксперимента и каждые последующие 10-е сутки. Пробы воды были отобраны весной (апрель – май), летом (июнь – июль) и осенью (сентябрь – октябрь) из водоемов пяти районов Витебской области, характеризующихся различной степенью антропогенной нагрузки (табл. 2). Способность к самоочищению водоемов оценивалась по содержанию и составу активных форм кислорода спектрофотометрическим методом, в качестве генерирующего агента использовали Fe^{2+} (реакция Фентона) [3]. Данный метод основан на образовании окрашенного в кроваво-красный цвет комплекса железа (III) с тиоционат-ионами. Для получения воспроизводимых и точных результатов концентрация тиоционат-ионов во всех растворах была постоянной. Раствор $[\text{Fe}^{3+}] = 0,1$ моль/ дм³ готовили непосредственно перед экспериментом. Оптическую плотность регистрировали на спектрофотометре СФ-2000 в герметично закрытых кюветах. В исследуемых системах ионов $[\text{Fe}^{3+}]$ максимум спектра поглощения был найден при длине волны 440 нм. Оптическую плотность регистрировали через 60 секунд после введения в исходные пробы природной воды ионов $[\text{Fe}^{2+}]$. Измерения проводили в кислой среде (pH=2,5) в связи с тем, что в ней исходная концентрация $[\text{Fe}^{2+}]$ постоянна, а образующийся $[\text{Fe}^{3+}]$ не выпадает в осадок.

Таблица 2

Места отбора проб воды

| Район отбора проб воды | Место отбора проб воды | Название водоема |
|------------------------|------------------------|-------------------|
| Витебский р-н | г. Витебск | р. Витьба |
| Дубровенский р-н | д. Ляды | оз. Афанасьевское |
| Ушачский р-н | д. Дубровка | оз. Дубровское |
| Шумилинский р-н | аг. Башни | оз. Будовесь |
| Россонский р-н | д. Селявщина | оз. Селявское |

Весь цифровой материал обрабатывался в программах Microsoft Excel и Statistica. Для проверки нормальности распределения данных использовался критерий Колмогорова–Смирнова, среднего абсолютного отклонения и Дэвида–Хартли–Пирсона. Для проверки гипотез о различии средних значений изучаемого признака в исследуемых группах применялся t-критерий Стьюдента для нормально распределенных данных.

Результаты и их обсуждение. В ходе проводившихся экспериментов установлено, что для поверхностных вод, содержащих небольшие количества диоксида углерода, характерна щелочная реакция. Изменения pH связаны с процессами фотосинтеза, так как водная растительность потребляет CO₂. Источниками ионов водорода являются гумусовые кислоты, присутствующие в почвах, и гидролиз солей тяжелых металлов (сульфаты железа, алюминия, меди и других металлов) при их попадании в воду в значительных количествах. Значение pH воды является одним из важных показателей качества воды и играет большую роль для химических и биологических процессов, происходящих в природных водоемах. От величины pH зависят развитие и жизнедеятельность водных растений, устойчивость различных форм миграции элементов, процессы превращения разных форм биогенных элементов, изменение токсичности загрязняющих веществ.

В водоеме открытого типа наблюдаются три этапа процесса закисления воды. На первом pH практически не меняется (ионы гидрокарбоната полностью нейтрализуют ионы H⁺). Этот этап происходит до понижения общей щелочности воды не менее 0,1 моль/дм³. На второй стадии закисления водоема pH воды не поднимается выше 5,5 в течение всего года, что характеризует умеренно кислые водные экосистемы. Этому этапу закисления присущи значительные изменения в видовом составе живых организмов. На третьем этапе pH водоемов стабилизируется на значениях pH<5 (обычно pH=4,5), даже если атмосферные осадки имеют более высокие значения pH. Это связано с присутствием гумусовых веществ и соединений алюминия в водоемах и почвенном слое.

Выявлено, что значение pH в водных экосистемах Витебской области изменяется в пределах 6,06–7,68. При этом концентрация ионов водорода подвержена сезонным колебаниям. Весной величина pH колеблется в пределах 6,06–6,39; летом – 7,11–7,68, осенью – 6,47–6,95.

В ходе экспериментов в воде природных водоемов Витебской области установлено, что наибольшие значения pH фиксируются в летний период отбора воды. Уменьшение pH в весенний период объясняется постепенным растворением углекислоты, образующейся в результате окисления активных форм кислорода органической составляющей пробы. В осенний период наблюдается снижение значений pH, по сравнению с летним, во всех исследуемых водоемах (табл. 3).

Таблица 3

Изменение водородного показателя в природных водоемах Витебской области по сезонам года ($M \pm m$)

| Название водоема | pH | | |
|-------------------------|------------------------|-----------|------------------------|
| | Весна | Лето | Осень |
| р. Витьба (n=9) | 6,06±0,01 ¹ | 7,11±0,02 | 6,47±0,02 ¹ |
| оз. Афанасьевское (n=9) | 6,10±0,02 ¹ | 7,38±0,01 | 6,80±0,01 ¹ |
| оз. Дубровское (n=9) | 6,26±0,01 ¹ | 7,40±0,01 | 6,61±0,01 ¹ |
| оз. Будовесь (n=9) | 6,29±0,01 ¹ | 7,68±0,01 | 6,91±0,01 ¹ |
| оз. Селявское (n=9) | 6,39±0,01 ¹ | 7,62±0,01 | 6,95±0,01 ¹ |

Примечание: ¹p<0,05 по сравнению с летним отбором проб.

Из рис. 1 следует, что закономерность изменений pH сходна во всех исследуемых водоемах Витебской области независимо от степени антропогенной нагрузки. pH водной экосистемы влияет на активность свободных радикалов и процессы самоочищения водоема.

При изучении изменения водородного показателя во времени было выявлено, что в каждой отдельно взятой пробе природной воды наблюдается естественное увеличение водородного показателя во времени в анаэробных условиях без доступа света (табл. 4). Уменьшение pH в первые 10 дней проведения опыта объясняется постепенным растворением углекислоты, образующейся в результате окисления активными формами кислорода органической составляющей пробы. В дальнейшем через 40–50 дней во всех пробах присутствует уже тенденция увеличения и стабилизации водородного показателя к 40–50-му дню эксперимента.

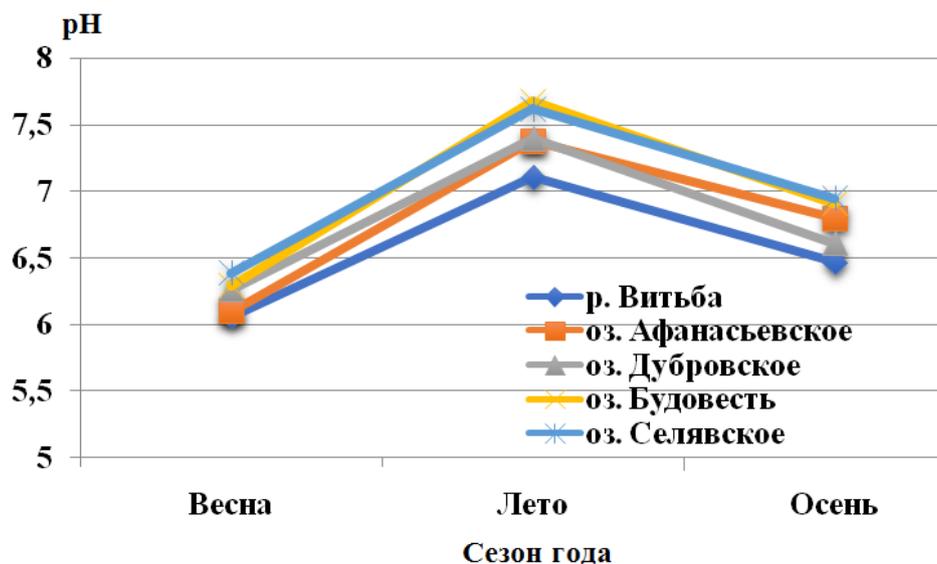


Рис. 1. Изменение водородного показателя в природных водоемах Витебской области в зависимости от сезона года

Таблица 4

Изменение величины водородного показателя (рН) в природных водоемах Витебской области в течение 60 дней ($M \pm m$)

| Название водоема | рН, день измерения | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 1 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| р. Витьба (n=9) | 7,11± 0,012 | 6,31± 0,013 ¹ | 6,48± 0,015 ¹ | 6,89± 0,010 | 7,10± 0,013 | 7,24± 0,009 | 7,24± 0,006 |
| оз. Афанасьевское (n=9) | 7,38± 0,010 | 6,42± 0,014 ¹ | 6,74± 0,016 ¹ | 6,96± 0,011 | 7,30± 0,013 | 7,42± 0,009 | 7,42± 0,011 |
| оз. Дубровское (n=9) | 7,40± 0,009 | 6,56± 0,013 ¹ | 6,78± 0,010 ¹ | 6,99± 0,009 | 7,35± 0,010 | 7,46± 0,013 | 7,46± 0,016 |
| оз. Будовесь (n=9) | 7,68± 0,018 | 6,62± 0,011 ¹ | 6,81± 0,010 ¹ | 6,95± 0,008 | 7,54± 0,010 | 7,72± 0,015 | 7,72± 0,011 |
| оз. Селявское (n=9) | 7,62± 0,009 | 6,53± 0,011 ¹ | 6,68± 0,010 ¹ | 7,11± 0,012 | 7,55± 0,009 | 7,71± 0,014 | 7,71± 0,009 |

Примечание: ¹p<0,05 по сравнению с рН на 60-й день эксперимента.

Как видно из рис. 2, значение водородного показателя во всех образцах воды из исследуемых водоемов устанавливается на 50-е сутки эксперимента и далее не изменяется. Статистически значимые различия в значениях рН зафиксированы между 10-ми и 60-ми; 20-ми и 60-ми сутками эксперимента. Закономерность изменения водородного показателя воды однотипна для всех исследуемых природных водных экосистем Витебской области в течение всех 60 дней исследований.

После выявления стабилизационных механизмов на 40–50-й день дальнейшее изучение свободно-радикальных процессов проводили с изменением устойчивости экосистем. Для этого с учетом химических реакций АФК и их значений констант скоростей (табл. 1) добавляли дополнительное количество пероксида водорода (0,1 моль/дм³) в пробы природной воды, что обуславливало резкое увеличение рН с момента введения и стабилизации (в 1,5–2 раза выше исходной пробы). Данные изменения связаны с подщелачиванием воды за счет окислительно-восстановительных реакций с участием пероксида водорода. Разложение пероксида водорода в водных растворах происходит непрерывно за счет

воздействия тепла, света, кавитации и других физико-химических воздействий, а восстановление – вследствие диссоциации с образованием гидроксид-иона и гидроксидного радикала, или посредством протонирования и распада на воду и гидроксидный радикал.

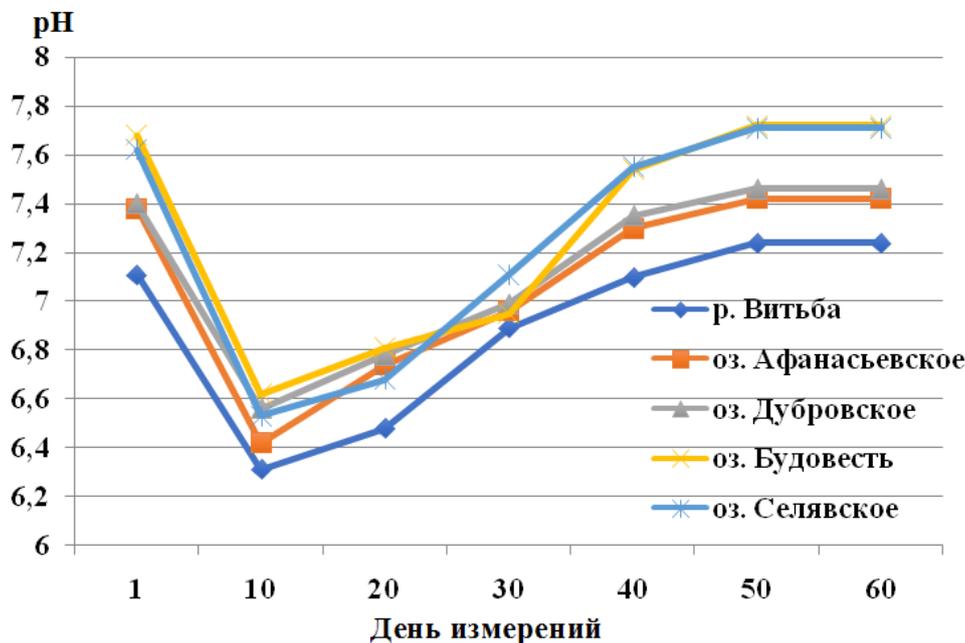


Рис. 2. Динамика водородного показателя во времени в природных водоемах Витебской области

Образовавшийся в итоге реакций гидроксидный радикал ($\text{HO}\cdot$) является наиболее реакционноспособным окислителем в природной среде и может реагировать практически со всеми растворенными в воде органическими и неорганическими веществами. Одноэлектронное восстановление H_2O_2 , которому способствует растворение в воде двухвалентного железа, приводит к образованию гидроксильных радикалов, обладающих чрезвычайно высокой реакционной способностью (реакция Фентона): $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \cdot\text{OH}$. К другим путям образования гидроксильного радикала относится реакция разложения гипохлорита, которая также протекает с участием Fe^{2+} : $\text{HOCl} + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{HO}\cdot + \text{Cl}^- + \text{Fe}^{3+}$. Установлено, что образование гидроксильного радикала возможно при разложении гипохлорита и железозависимым путем: $\text{HOCl} + \text{O}_2^- \rightarrow \text{HO}\cdot + \text{Cl}^- + \text{O}_2$.

Гидроксильный радикал обладает высоким в живой природе редокс-потенциалом ($E_0 = +2,7 \text{ В}$) и вследствие этого наибольшей химической активностью. Наибольшее негативное воздействие он оказывает при реакции с ДНК, белками и полиненасыщенными жирными кислотами внутриклеточных и плазматических мембран, что определяет сильнейшее мутагенное и цитотоксическое действие гидроксильного радикала. В природе нет специальных ферментативных систем, обладающих способностью инактивировать гидроксильный радикал. Ингибировать $\cdot\text{OH}$ -радикал могут низкомолекулярные соединения при их достаточно высоких концентрациях (урацил, мочевиная кислота, салицилаты, глюкоза, диметилсульфоксид). Предотвращение повреждений клеточных структур осуществляется за счет снижения концентрации радикалов предшественников – супероксиданион-радикала и перекиси водорода.

Способность к самоочищению водоемов оценивалась по реакции Фентона. Выявлено, что в результате радикальных перегруппировок образуются более стабильные и долгоживущие радикалы. Рекомбинация углеродсодержащих радикалов приводит к образованию органических соединений и выпадению осадка в исследуемых пробах воды. Осадок может образовываться в чистых растворах гидрокарбонатов и водопроводной воде при длительном отстаивании. В природной воде образуется осадок темный рыжеватого-коричневого цвета, что связано с включением в процессы радикальных превращений фрагментов гумусовых соединений, которые в значительном количестве содержатся в природных водных экосистемах. При накоплении карбонат-ионов в природной воде восстановление гидроксидных

радикалов происходит по уравнению: $\bullet\text{OH} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3\cdot + \text{OH}^-$. Лимитирующим фактором данной реакции является активность гидроксидных радикалов, концентрация которых составляет в природных водоемах $10^{-15} \dots 10^{-17}$ моль/дм³. При добавлении в пробы пероксида водорода фиксируются увеличение концентрации гидроксил-ионов и подщелачивание проб воды.

Для определения стационарной концентрации АФК в воде природных водоемов в качестве генерирующего агента использовали Fe^{2+} и учитывались константы скоростей реакций кинетической модели реакции Фентона (табл. 5).

Таблица 5

Кинетическая модель реакции Фентона в кислой среде и значения константы скорости

| Кинетическая модель реакции Фентона | Константа скорости – k, дм ³ /(моль·с) |
|---|---|
| $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \bullet\text{OH}$ | 56 |
| $\text{H}_2\text{O}_2 + \bullet\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \bullet\text{HO}_2$ | $3 \cdot 10^7$ |
| $\text{Fe}^{2+} + \bullet\text{OH} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$ | $8,3 \cdot 10^5$ |
| $\bullet\text{OH} + \bullet\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2$ | $5,5 \cdot 10^9$ |
| $\bullet\text{OH} + \bullet\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ | $7,5 \cdot 10^6$ |
| $\bullet\text{OH} + \text{HO}_2^- \rightarrow \bullet\text{HO}_2 + \text{OH}^-$ | $7,5 \cdot 10^9$ |
| $\bullet\text{OH} + \text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ | 10^{10} |

Анализ табл. 5 позволяет по соотношению концентраций установить вид преобладающего свободного радикала в природных водоемах Витебской области.

Для случая $[\text{Fe}^{2+}] > [\text{H}_2\text{O}_2]$ при $[\text{H}_2\text{O}_2] = 10^{-3} \dots 10^{-5}$ моль/дм³ предельная концентрация образующегося $[\text{Fe}^{3+}]$ определяется тем, что одна молекула H_2O_2 распадается на два гидроксильных радикала, каждый из которых окисляет одну молекулу двухвалентного железа [1].

При концентрации $[\text{H}_2\text{O}_2] = 10^{-3} \dots 10^{-5}$ моль/дм³ за 60 с успевает произойти число актов окисления, равное числу образующихся при разложении пероксида водорода гидроксидных радикалов. Влияние реакции существенно только для природной системы, в которой $[\text{Fe}^{2+}] > [\text{H}_2\text{O}_2]$: $\text{O}_2 + \text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2$.

В проведенных экспериментальных исследованиях природной воды из водоемов Витебской области таких соотношений не выявлено. Анализ кинетической модели реакции Фентона при данных условиях показал, что основной активной частью в исследуемых природных водных экосистемах является гидроксидный радикал.

Таблица 6

Оптическая плотность природной воды из водоемов Витебской области через 60 секунд после введения в исходные пробы природной воды ионов $[\text{Fe}^{2+}]$

| Название водоема | Оптическая плотность |
|-------------------------|----------------------|
| р. Витьба (n=9) | $0,12 \pm 0,009^1$ |
| оз. Афанасьевское (n=9) | $0,15 \pm 0,015^1$ |
| оз. Будовесь (n=9) | $0,61 \pm 0,020$ |
| оз. Дубровское (n=9) | $0,16 \pm 0,013^1$ |
| оз. Селявское (n=9) | $0,68 \pm 0,018$ |

Примечание: ¹p<0,05 по сравнению с оптической плотностью проб воды из оз. Селявского.

Из табл. 6 следует, что существуют значительные отличия в окислительной способности природных водных экосистем. Максимальная оптическая плотность, а следовательно, и в активность свободных форм кислорода обнаружена в оз. Селявском и оз. Будовесь, а минимальное – в р. Витьбе, оз. Афанасьевском, оз. Дубровском. По результатам анализа следует, что чем меньше зафиксированная оптическая плотность природной воды, тем меньше способность у водной экосистемы генерировать

достаточное количество активных форм кислорода, что приводит к их эвтрофированию. Реакция Фентона в природной воде из водоемов Витебской области зависит от трофности водоемов.

Природная вода из озера Будовесь и озера Селявского обладает сходными значениями оптической плотности, данный тип озер – олиготрофные. Показатели других озер имеют низкие значения и относятся к мезотрофному и мезоэвтрофному типу. Таким образом, активные формы кислорода играют важную роль в биологических и природных водных экосистемах. Активные формы кислорода влияют на процессы самоочищения в природной воде. Выявлено, что эффективность процесса самоочищения определяется способностью природных водных экосистем генерировать активные формы кислорода, участвующие в процессах пероксидного окисления [6].

Заключение. Возрастающее антропогенное загрязнение пресных водоемов является экологической и социальной проблемой. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы разработки достаточно простых и информативных методов биоиндикации его воздействия на биоту водоемов, которые возможно применить в мониторинговых и серийных экологических и таксономических исследованиях. Изучение проб воды из природных водоемов Витебской области показало, что значение pH в водных экосистемах Витебской области изменяется в пределах 6,06–7,68 и подвержено сезонным колебаниям. Весной величина pH колеблется в пределах 6,06–6,39; летом – 7,11–7,68, осенью – 6,47–6,95. Водородный показатель влияет на активность свободных радикалов и процессы самоочищения водоема. В анаэробных условиях без доступа света в течение 60 дней эксперимента зафиксированы естественное уменьшение водородного показателя (10–30-й день) и дальнейшее увеличение и стабилизация на 40–50-й день. Установлено, что все изучаемые водоемы имеют сходную окислительную способность и основным видом преобладающих активных форм кислорода является гидроксильный радикал. Максимальным содержанием активных форм кислорода характеризуется вода из оз. Селявского и оз. Дубровского, а минимальным – из р. Витьбы, оз. Афанасьевского, оз. Будовесь, что влияет на трофность данных водоемов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурикова, Ю.В. Природная вода как окислительная среда / Ю.В. Гурикова, Н.Ф. Бондаренко // Журнал физической химии. – 2001. – Т. 75, № 7. – С. 640.
2. Зуева, Н.В. Биоиндикация и биотестирование в пресноводных экосистемах: учеб. пособие / Н.В. Зуева. – СПб.: РГГМУ, 2019. – 140 с.
3. Аристова, Н.А. Влияние люминола на интенсивность хемилюминесценции в реакции Фентона / Н.А. Аристова [и др.] // Химия высоких энергий. – 2011. – Т. 45, № 6. – С. 543–547.
4. Скурлатов, Ю.И. Определяющая роль окислительно-восстановительных процессов в формировании качества природной водной среды / Ю.И. Скурлатов // Успехи химии. – 1991. – Т. 60, вып. 3. – С. 575–580.
5. Качество воды. Определение pH: ГОСТ ISO 10523-2017. – Введ. 01.07.09. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. – 16 с.
6. Балаева-Тихомирова, О.М. Корреляционные зависимости физико-химических характеристик воды и почв прибрежной зоны природных водоемов Витебской области / О.М. Балаева-Тихомирова, Е.И. Кацнельсон, Т.В. Сидорова // Весн. Мазыр. дзярж. пед. ун-та. – 2021. – № 2(58). – С. 3–7.

REFERENCES

1. Gurikova Yu.V., Bondarenko N.F. *Zhurnal fizicheskoi khimii* [Journal of Physical Chemistry], 2001, 75(7), p. 640.
2. Zuyeva N.V. *Bioindikatsiya i biotestirovaniye v presnovodnykh ekosistemakh: ucheb. posobiye* [Bioindication and Biotesting in Freshwater Ecosystems: Textbook], SPb.: RGGMU, 2019, 140 p.
3. Aristova N.A. *Khimiya vysokikh tekhnologii* [Chemistry of High Technologies], 2011, 45(6), pp. 543–547.
4. Skurlatov Yu.I. *Uspekhi khimii* [Chemistry Success], 1991, 60(3), pp. 575–580.
5. *Kachestvo vody. Opredeleniye pH: GOST ISO 10523-2017. – Vved. 01.07.09* [Quality of Water. Identification of pH: GOST ISO 10523-2017. – Introduced 01.07.09], Minsk: Belarus. gos. in-t standartizatsii i sertifikatsii, 2009, 16 p.
6. Balayeva-Tikhomirova O.M., Katsnelson E.I., Sidorova T.V. *Vesn. Mazyr. dziarzh. ped. un-ta* [Journal of Mazyr State Pedagogical University], 2021, 2(58), pp. 3–7.

Поступила в редакцию 13.05.2024

Адрес для корреспонденции: e-mail: olgabal.tih@gmail.com – Балаева-Тихомирова О.М.