

БІЯЛАГІЧНЫЯ НАВУКІ

УДК 556.5:556.114(476.5)

О. М. Балаева-Тихомирова¹, Е. И. Кацнельсон², Т. В. Сидорова³

¹ Кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой химии и естественнонаучного образования, УО «Витебский государственный университет им. П. М. Машерова», г. Витебск, Республика Беларусь

² Преподаватель кафедры химии и естественнонаучного образования, УО «Витебский государственный университет им. П. М. Машерова», г. Витебск, Республика Беларусь

³ Студентка 4 курса факультета химико-биологических и географических наук, УО «Витебский государственный университет им. П. М. Машерова», г. Витебск, Республика Беларусь

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДЫ И ПОЧВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ ВИТЕБСКОЙ ОБЛАСТИ

В статье рассматривается влияние антропогенной нагрузки на ферментативную активность почв и физико-химические показатели почвы и воды водоёмов Витебской области. Наиболее информативным и достоверным показателем, характеризующим состояние почвы, является активность протеазы, уреазы и каталазы. С помощью методов корреляционного анализа выявлена средняя и высокая теснота корреляционной связи между ферментами почвы и физико-химическими показателями почвы и воды. Снижение антропогенной нагрузки приводит к повышению корреляционной зависимости между ферментативной активностью почв и физико-химическими показателями почвы и воды.

Ключевые слова: корреляционный анализ, тяжёлые металлы, ферментативная активность почв, сульфат-ионы, жёсткость воды.

Введение

Физико-химические характеристики воды природных водоемов и почвы прибрежных районов позволяют сформировать представления об особенностях функционирования данной экосистемы и степени влияния антропогенных факторов на окружающую среду.

Свойства и качество воды зависят от состава и концентрации содержащихся в ней веществ. Природная вода содержит многочисленные растворенные вещества – соли, кислоты, щелочи, газы, продукты отходов промышленных предприятий и нерастворимые частицы минерального и органического происхождения.

Биохимический гомеостаз почвы поддерживается ферментами. Почвы характеризуются неоднородностью состава, но основные компоненты остаются стабильными: содержание органического вещества (гумуса, полисахаридов, аминокислот, витаминов), подвижных форм элементов и кислотность. Внесение органических и минеральных удобрений, пестицидов, промышленных и сельскохозяйственных отходов изменяет биохимическое равновесие почв. Почва с большим числом микроорганизмов, обладающая высокой ферментативной активностью и буферностью, способна восстанавливать равновесие [1].

Ферменты в почве обладают высокой устойчивостью к неблагоприятным условиям (повышенная влажность, антибиотические препараты, пестициды, тяжелые металлы). Функция ферментов при этом заключается в стабилизации метаболизма в почве, когда жизнедеятельность микроорганизмов подавляется. Активность почвенных ферментов используется как диагностический критерий почвенного плодородия, а изменение ферментативной активности сигнализирует об антропогенном воздействии [2]. Ферменты демонстрируют высокую устойчивость при длительном хранении, этот факт, а также низкая ошибка опытов способствуют применению параметров ферментативной активности как диагностического показателя состояния почвы [3].

Ранее были выявлены взаимосвязи между количеством ионов тяжелых металлов в почве и ее ферментативной активностью, определены химические характеристики воды из природных водоемов [4].

Для установления соотношений между полученными физико-химическими характеристиками необходимо проведение корреляционного анализа, позволяющего определить статистические взаимосвязи двух или более случайных величин. Коэффициент корреляции показывает степень связи показателей: изменение одной случайной величины ведёт к закономерному изменению другой случайной величины.

Цель работы состояла в установлении корреляционных взаимосвязей между физико-химическими показателями воды и почвы прибрежной зоны водоемов Витебской области, подверженных различной антропогенной нагрузке.

Методы и методология исследования

Материалом исследования были почвы и вода, на которые оказывалась различная антропогенная нагрузка (таблица 1).

Таблица 1. – Места отбора проб воды, почвы и моллюсков

Район сбора	Место сбора	Название водоема
Дубровенский район	д. Шеки	озеро Афанасьевское
Сенненский район	г. Сенно	озеро Сенненское

Исследовались основные диагностические показатели состояния почвы и воды: концентрации подвижных форм химических элементов в почве (ионы меди, железа и цинка); определена карбонатная и общая жесткость воды и содержание сульфат-ионов (SO_4^{2-}), активность почвенных ферментов (каталазы, уреазы, протеазы).

Математическую обработку полученных результатов проводили методами непараметрической статистики с использованием пакета Statistica. Для проверки нормальности распределения данных использовали критерий Колмогорова-Смирнова, среднего абсолютного отклонения Дэвида-Хартли-Пирсона. Для проверки гипотез о наличии связей между показателями использовался корреляционный анализ по Спирмену.

В почвенных образцах исследуемых прибрежных территорий была определена активность ферментов, ответственных за наиболее важные биохимические процессы, протекающие в почве:

- каталазы, за счет которой осуществляется разложение перекиси водорода;
- уреазы, вызывающей гидролиз мочевины;
- протеазы, образующей аминокислоты.

Почвенно-энзиматические методы позволяют определять активность ферментов, находящихся преимущественно в иммобилизованном состоянии на поверхности почвенных коллоидов и частично в почвенном растворе.

Анализ воды и почвы проводился в течение 3 недель с момента отбора проб, в целях избежания изменения состава и ферментативной активности исследуемых проб.

Для определения в почвах ионов тяжелых металлов была проведена предварительная пробоподготовка. Почву помещали в чашки Петри и ставили в термостат при 40 °С на 24 часа. Затем ее измельчали в ступке и просеивали через сито, а из просеянной почвы готовили почвенную вытяжку. Для извлечения тяжелых металлов из почв использовали 1М раствор HCl. Соотношение между объемами почвы и раствора – 1:10, время экстракции – 1 час при периодическом взбалтывании [5].

Определение ионов цинка проводили при помощи комплексометрического титрования на основании образования комплексов ионов металлов с аминокислотами [6]. Ионы меди определяли методом прямой фотометрии [7]. Определение железа (II) проводили спектрофотометрическим методом на основании образования окрашенного комплексного соединения сульфосалициловой кислоты или (натриевой соли) с солями железа [8].

Определение содержания сульфат-ионов в воде проводили методом турбидиметрии [9]. Определение общей и карбонатной жесткости воды осуществляли методом комплексометрического титрования [9].

Активность каталазы почвы определяли титриметрическим методом, по количеству неразложившейся перекиси [10]. Спектрофотометрическое определение активности протеазы проводили на основе учета количества аминокислот, образующихся при протеолитическом расщеплении белков [10]. Определение активности уреазы почвы проводится спектрофотометрическим методом, основанным на учете количества аммиака, образующегося при гидролизе карбамида [11].

При исследовании физико-химических показателей воды и почвы была выдвинута гипотеза, что содержание ионов тяжелых металлов в почве взаимосвязано с их концентрацией в воде и активностью ферментов в почве прибрежной зоны. Увеличение концентрации ионов тяжелых металлов в воде и почве приводит к ингибированию активности ферментов в почве.

Следовательно, между концентрацией ионов тяжелых металлов, исследуемых в почве и воде и ферментативной активностью должны прослеживаться «+» корреляционные взаимосвязи.

Результаты исследования и их обсуждение

Выбор исследованных территорий основан на характеристиках водоема по месторасположению и факторам, влияющим на экологические особенности: близость расположения к предприятиям, транспортным и железнодорожным магистралям, сельскохозяйственным фермам, использование в качестве зон отдыха населения. По этим характеристикам были отобраны 2 водоема: озеро Афанасьевское – средняя степень антропогенной нагрузки, озеро Сенненское – высокая степень антропогенной нагрузки.

Данные особенности физико-химических показателей и их корреляционных взаимосвязей связаны с экологическими характеристиками исследуемых озер.

Озеро Афанасьевское расположено в Дубровенском районе Витебской области, в 5,2 км от границы со Смоленской областью (Российская Федерация), в 20 км от г. Дубровно и относится к бассейну реки Лучеса. Площадь зеркала – 0,24 км, длина – 1,5 км, наибольшая ширина – 0,35 км, максимальная глубина – 2,7 м, длина береговой линии – 2,4 км. Объем воды – 0,43 млн. м³, площадь водосбора – 80,7 км. Местность, заросшая лесом, на северо-западе – грядисто-холмистая, сильно заболочена и труднопроходима. Берега песчаные, преимущественно высокие, поросшие лесом и кустарником. Мелководье узкое, песчаное, глубже дно сапропелистое. Зарастает умеренно. На западе соединено с системой мелиорационных каналов.

Озеро подвергается антропогенной нагрузке, так как используется для мелиорации земель, что приводит к загрязнению воды и береговой зоны водоема, что доказывается высоким содержанием ионов меди и цинка в воде; цинка в почве, превышающими ПДК.

Вследствие того, что озеро используется в мелиорационных целях, оно испытывает сильную антропогенную нагрузку, это отражается в первую очередь на накоплении ионов тяжелых металлов в почве и воде и корреляционных зависимостях между ними (таблица 2).

Таблица 2. – Корреляционные зависимости физико-химических характеристик воды и почвы озера Афанасьевское Дубровенского района

Показатели	Коэффициент корреляции (R) по Спирмену	Теснота корреляционной связи	Уровень значимости по Манну-Уитни
Fe ²⁺ (п) – уреазы (п)	0,81119	сильная	P = 0,0004
Zn ²⁺ (п) – уреазы (п)	0,67133	средняя	P = 0,0037
Общая жесткость (в) – каталазы (п)	0,70527	сильная	P = 0,0004
Карбонатная жесткость (в) – каталазы (п)	0,85615	сильная	P = 0,0004
Zn ²⁺ (в) – протеазы (п)	0,96673	сильная	P = 0,0604
Cu ²⁺ (в) – Fe ²⁺ (в)	0,62238	средняя	P = 0,0004
SO ₄ ²⁻ (в) – медь (в)	0,62937	средняя	P = 0,0004
Fe ²⁺ (в) – цинк (в)	0,63047	средняя	P = 0,0006
Общая жесткость (в) – карбонатная жесткость (в)	0,61796	средняя	P = 0,0004

Из анализа таблицы 2 следует, что при сравнении физико-химических характеристик воды и почвы прибрежной зоны выявлены статистически значимые корреляционные связи средней и сильной силы взаимного влияния.

Наиболее тесные положительные корреляционные взаимосвязи найдены для содержания ионов железа в почве и активности каталазы в почве, карбонатной жесткости воды и активности протеазы в почве, содержания ионов цинка в почве и активности протеазы в почве. Данная степень корреляционной взаимосвязи составила от 0,81119 (P = 0,0004) до 0,96673 (P = 0,0604). Сильная степень корреляционной связи отмечена для общей жесткости воды и активности каталазы в почве и составила 0,70525 (P = 0,0004).

Отрицательных корреляционных связей между физико-химическими характеристиками воды и почвы из озера Афанасьевского не выявлено.

Озеро Сенненское находится в Сенненском районе Витебской области, примыкает к северной окраине г. Сенно и относится к бассейну реки Кривинка. Площадь зеркала – около 3,37 км, длина озера – 6,03 км, наибольшая ширина – 0,92 км, максимальная глубина – 31,5 м, средняя глубина – 8,6 м, длина береговой линии – около 19 км. Объем воды – около 27 млн. м³, площадь водосбора – около 70 км.

Местность преимущественно грядисто-холмистая, поросшая кустарником и редколесьем, местами болотистая. На востоке и севере расположены обширные лесные массивы, на западе – комплекс небольших лесов, соединенных перелесками. Озеро мезотрофное, ложбинного типа, разделяется на северный (мелководный) и южный (глубоководный) плесы. Береговая линия сильно изрезанная, образует множество заливов, мысов и полуостровов. Берега песчаные, преимущественно высокие, местами обрывистые, поросшие кустарником и редколесьем. Мелководье узкое, песчаное, глубже дно илистое. Прозрачность воды невысокая. Зарастает умеренно.

На экологическое состояние озера Сенненское и его прибрежной зоны неблагоприятное воздействие оказывают следующие факторы: использование водных ресурсов озера в сельском хозяйстве, близкое расположение животноводческих ферм и стоки городской канализации. Поскольку загрязнение воды в озере происходит преимущественно вследствие сброса в нее промышленных, бытовых и сельскохозяйственных отходов, это может привести к полной деградации водоёма как источника водоснабжения. В пробах воды превышено ПДК ионов железа и цинка; в почве – ионов меди и цинка. Активность почвенных ферментов зависит от содержания ионов тяжелых металлов в ней. Прослеживается зависимость между превышающими ПДК концентрациями ионов железа и цинка и средней и высокой активностью ферментов каталазы, протеазы и уреазы.

Вследствие того, что озеро используется в сельском хозяйстве, близко расположено к животноводческой ферме и стокам канализации, оно испытывает неблагоприятное антропогенное влияние, это отражается в первую очередь на накоплении ионов тяжелых металлов в почве и воде и корреляционных зависимостях между ними (таблица 3).

Таблица 3. – Корреляционные зависимости физико-химических характеристик воды и почвы озера Сенненское Сенненского района

Показатели	Коэффициент корреляции (R) по Спирмену	Теснота корреляционной связи	Уровень значимости по Манну-Уитни
Fe ²⁺ (п) – уреазы (п)	0,69930	средняя	P = 0,0004
Zn ²⁺ (п) – уреазы (п)	0,67383	средняя	P = 0,0004
Общая жесткость (в) □ каталазы (п)	0,68542	средняя	P = 0,0011
Карбонатная жесткость (в) □ каталазы (п)	0,61646	средняя	P = 0,0004
Zn ²⁺ (в) – протеазы (п)	0,85315	сильная	P = 0,0303
Cu ²⁺ (в) – Fe ²⁺ (в)	0,69930	средняя	P = 0,0004
SO ₄ ²⁻ (в) – медь (в)	0,67133	средняя	P = 0,0004
Fe ²⁺ (в) – Zn ²⁺ (в)	0,72727	сильная	P = 0,0006
Общая жесткость (в) – карбонатная жесткость (в)	0,64437	средняя	P = 0,0004

Из анализа таблицы 3 следует, что установлены статистически значимые корреляционные связи средней и сильной силы взаимного влияния.

Наиболее прочные положительные корреляционные взаимосвязи найдены между содержанием ионов цинка и ионов железа в воде, содержанием ионов цинка в воде и активностью протеазы почвы и составляют 0,72727 (P = 0,0006) и 0,85315 (P = 0,0303) соответственно.

Отрицательных корреляционных связей между физико-химическими характеристиками воды и почвы из озера Сенненское не выявлено.

Данные взаимосвязи свидетельствуют о линейной зависимости рассматриваемых показателей друг от друга и доказывают статистически значимую взаимосвязь колебаний значений показателей. Выявлено, что изменение величины одного из показателей приводит к закономерному изменению величины другого показателя. Положительные корреляционные связи свидетельствуют о фиксировании закономерного увеличения или уменьшения взаимосвязанных характеристик.

Исходя из данных, представленных в таблицах 2 и 3, можно заключить, что содержание ионов тяжелых металлов в почве взаимосвязано с их концентрацией в воде и активностью ферментов в почве прибрежной зоны. Увеличение концентрации ионов тяжелых металлов в воде и почве приводит к ингибированию активности ферментов в почве.

Заклучение

При снижении антропогенной нагрузки фиксируется повышение корреляционной взаимосвязи между ферментативной активностью почв и физико-химическими показателями почвы и воды. Активность ферментов (каталазы, протеазы, уреазы), в свою очередь, определяет протекание биохимических процессов в почве. Комплекс указанных почвенных ферментов можно использовать для оценки биологической активности и состояния почв, лежащей в основе ранней диагностики в системе почвенного мониторинга. Корреляционный анализ позволяет определять уровень взаимосвязи показателей внутри водной экосистемы и прогнозировать ее дальнейшее развитие и функционирование.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Albiach, R. Organic matter components, aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years / R. Albiach, R. Canet, F. Pomares, F. Ingelmo // *Bioresource Technology*. – 2001. – V. 77. – № 2. – P. 109–114.
2. Безуглова, О. С. Влияние города на почвообразование и свойства почв / О. С. Безуглова, С. Н. Горбов, И. В. Морозов // *Экологические проблемы антропогенных ландшафтов Ростовской области*. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦВШ, 2003. – Т. 1. Экология города Ростова-на-Дону. – С. 182–240.
3. Вальков, В. Ф. Почвоведение : учебник для вузов / В. Ф. Вальков, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – М. : ИКЦ «Март», 2004. – 496 с.
4. Балаева-Тихомирова, О. М. Комплексная характеристика состава природных водоёмов и почв прибрежных районов как среды обитания пресноводных легочных моллюсков / О. М. Балаева-Тихомирова, Е. И. Кацнельсон, Н. Ю. Полозова // *Вестн. Витебск. дзярж. ун-та*. – 2019. – № 3 (104). – С. 71–78.
5. Аринушкина, Е. В. Руководство по химическому анализу почв / Е. В. Аринушкина. – М. : Изд-во МГУ, 1970. – 471 с.
6. Орлов, Д. С. Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв / Д. С. Орлов, В. Д. Васильевская. – М. : Изд-во МГУ, 1994. – 272 с.
7. Жерносек, А. К. Физико-химические методы анализа / А. К. Жерносек, И. С. Борисевич. – Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2012. – 12 с.
8. Звягинцев, Д. Г. Биология почв / Д. Г. Звягинцев. – М. : МГУК, 2005. – 241 с.
9. Алексеев, В. Н. Количественный анализ / В. Н. Алексеев. – М. : Химия, 1972. – 254 с.
10. Хазиев, Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев. – М. : Наука, 2005. – 252 с.
11. Галстян, А. Ш. Диагностика эродированных почв по активности ферментов / А. Ш. Галстян // *Проблемы и методы биологической диагностики почв*. – М. : Наука, 1976. – С. 317–328.

Поступила в редакцию 12.07.2021

E-mail: olgabal.@gmail.com; kate_kaznelson@tut.by;
tatic723p@gmail.com

O. M. Balaeva-Tikhomirova, E. I. Katsnelson, T. V. Sidorova

CORRELATION DEPENDENCES OF PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF NATURAL RESERVOIRS OF THE VITEBSK REGION

The article examines the influence of anthropogenic load on the enzymatic activity of soils and physico-chemical parameters of soil and water reservoirs of the Vitebsk region. The most informative and reliable indicator characterizing the state of the soil is the activity of protease, urease and catalase. With the help of correlation analysis methods, the medium and high closeness of the correlation relationship between soil enzymes and physico-chemical parameters of soil and water was revealed. A decrease in anthropogenic load leads to an increase in the correlation between the enzymatic activity of soils and the physico-chemical parameters of soil and water.

Keywords: correlation analysis, heavy metals, soil enzymatic activity, sulfate ions, water hardness.