

Рациональное природопользование

УДК 546.74:581.526.3:556.551:627.157(476.2-21Гомель)

DOI 10.24411/2409-3203-2019-12133

СОДЕРЖАНИЕ И НАКОПЛЕНИЕ НИКЕЛЯ В ВЫСШИХ ВОДНЫХ РАСТЕНИЯХ, ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОЁМОВ Г. ГОМЕЛЯ

Макаренко Татьяна Викторовна

к.б.н., доцент кафедры химии

ГГУ им. Ф. Скорины

Беларусь, г. Гомель

Попичева Екатерина Александровна

студент кафедры химии

ГГУ им. Ф. Скорины

Беларусь, г. Гомель

Аннотация: Статья посвящена исследованию содержания и накоплению никеля в высших водных растениях, поверхностных водах и донных отложениях водоёмов г. Гомеля. Наиболее высокое содержание металла наблюдается в макрофитах озёр Любенское, Волотовское и Шапор. При увеличении содержания никеля в донных отложениях, накопление данного металла в макрофитах снижается, а при увеличении концентрации никеля в воде – не изменяется.

Ключевые слова: Тяжёлые металлы, макрофиты, донные отложения, поверхностные воды, коэффициент накопления.

NICKEL CONTENT AND ACCUMULATION IN HIGHER AQUATIC PLANTS, SURFACE WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS OF WATER BODIES OF GOMEL

Tatyana V. Makarenko

PhD, Associate Professor of chemistry

Gomel State University named after F. Skorina

Belarus, the city of Gomel

Ekaterina A. Popicheva

Student of chemistry Department

Gomel State University named after F. Skorina

Belarus, the city of Gomel

Abstract: The article is devoted to the study of Nickel content and accumulation in higher aquatic plants, surface waters and bottom sediments of Gomel reservoirs. The highest metal content was observed in macrophytes lakes Lubenskoe, Volotovskiy and Sapor. With an increase in the Nickel content in bottom sediments, the accumulation of this metal in macrophytes decreases, and with an increase in the concentration of Nickel in water – does not change.

Keywords: Heavy metals, macrophytes, sediments, surface water, accumulation factor.

Содержание металлов в высших водных растениях значительно изменяется в зависимости от биологической роли, которую они играют в организме. Выделяют две большие группы металлов: макро- и микроэлементы. Большая часть металлов – микроэлементы, однако потребность в них у различных растений неодинакова [1]. Практически все микроэлементы являются тяжёлыми металлами, которые в зависимости от концентрации в среде обитания выступают либо в качестве необходимых для организмов микроэлементов, либо как тяжёлые металлы, т.е. токсичные для организма.

Многие исследования показывают, что различные виды макрофитов способны аккумулировать разное количество тяжёлых металлов. Их содержание в водных организмах, в частности в растениях, используется для оценки степени загрязнения водных экосистем и миграции металлов по трофическим цепям, где макрофиты являются продуцентами. Во время своего роста и развития высшие водные растения способны поглощать, накапливать и переводить в хелатные формы химические элементы, тем самым снижая концентрации токсичных элементов в водоёме и улучшая качество воды [2, 3]. Однако по концентрации отдельных металлов в определённых элементах водных экосистем нельзя составить общей картины их загрязнённости. Для этого необходимо учитывать показатели общего загрязнения, учитывающие роль каждого тяжёлого металла в общем загрязнении компонентов водной экосистемы. Так, концентрации тяжёлых металлов в поверхностных водах отражают текущее состояние водоёмов, а донные отложения являются важным «резервуаром» накопления тяжёлых металлов в водной среде.

У водных растений существует активный и пассивный механизмы поступления металлов как из воды, так и из донных отложений. Такой способностью к поглощению обладают различные органы растений – корни, листья, стебли, что делает макрофиты пригодными для изменения содержания тяжёлых металлов в водной среде. Однако до сих пор проводятся многочисленные исследования для получения более подробной информации о способности различных водных растений накапливать тяжелые металлы и взаимосвязи между их концентрациями в растениях и донных отложениях и воде [4].

Цель работы: проведение сравнительного анализа содержания и накопления никеля в донных отложениях, поверхностных водах и высших водных растениях водоёмов г. Гомеля для определения степени влияния городской агломерации на уровень загрязнения водоёмов.

Материалы и методы исследований. В связи с различными путями поступления элементов в ткани растений, важным является дифференцированное распределение накопления элементов растениями различных экологических групп. Вследствие того, что не во всех изучаемых водоемах можно встретить представителей одного вида гидрофитов, при проведении сравнительного анализа состояния растительности водоемов могут возникать сложности. Поэтому все макрофиты разделяют на несколько экологических групп, исходя из способа поступления металла в органы и ткани растений. Согласно классификации В.М. Катанской [5], выделяют четыре экологические группы водных растений: I – свободноплавающие неприкрепленные, получающие элементы минерального питания, как правило, из воды или воздушных масс; II – плавающие прикрепленные растения, которые, кроме водной массы, получают большую часть химических элементов из донных отложений; III – подводные (погруженные) растения, способные в период вегетации менять источники поступления химических веществ в свои ткани; IV – надводные (воздушно-водные) растения, для которых донные отложения являются основным источником поступления веществ при значительной роли водной массы и атмосферного поступления веществ.

Исследования проводились в летний период 2018 г. Для этого был выбран один вид макрофитов, относящийся к третьей экологической группе: рдест пронзённолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.). Растения данной группы – погруженные или почти погруженные гидрофиты, способные поглощать для жизнедеятельности вещества как из водных масс, так и из донных отложений. В научной литературе [6] часто встречается

информация о влиянии последних на содержание загрязнителей в погружённых растениях, поэтому в настоящем исследовании проводится сравнение концентрации металлов в растениях, а также донных отложениях и поверхностных водах. Отбор проб макрофитов производился в водоёмах г. Гомеля, различающихся по степени антропогенной нагрузки, и была проанализирована их надземная часть. После тщательного ополаскивания пробы растений последовательно высушивали и озоляли в муфельной печи при 450°C. Содержание никеля в золе растений определяли атомно-эмиссионным спектральным методом на спектрофотометре PGS-2 в лаборатории аналитического контроля РУП «Белорусский научно-исследовательский геологоразведочный институт» [7].

Для исследования также были выбраны водоёмы г. Гомеля, испытывающие различную антропогенную нагрузку: озёра Володькино, Дедно, Шапор, Любенское и Волотовское. Оз. Володькино – водоём, возникший в результате расширения коренного русла р. Сож в месте впадения в него р. Ипуть. Оно расположено в черте города и активно используется в рекреационных целях, однако подвержено влиянию разбавленных сточных вод предприятий г. Добруша. Озёра Дедно, Шапор и Любенское – пойменные водоёмы, не утратившие связь с коренным руслом р. Сож. Через небольшую земляную дамбу оз. Дедно связано с водоёмом, принимающим стоки Прудковского и Хатаевичского коллекторов, а также стоки автопредприятий и фабрики «Спартак». В оз. Шапор поступают поверхностные стоки с территории предприятий ОАО «Гомельдрев», «Гомельобой» и ФСК. Оз. Любенское расположено в городской зоне отдыха и также используется в рекреационных целях. Оз. Волотовское – полностью замкнутый непроточный водоём городской зоны отдыха, однако практически со всех сторон окружён автотрассой.

Отбор проб воды на различных участках указанных водоёмов проводился батометром, по методике, описанной в источнике [8]. На ААС «PerkinElmer – 406» атомно-абсорбционным методом определялось содержание тяжёлых металлов в исследуемых образцах поверхностных вод на базе Государственного 29 учреждения «Гомельский областной центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья».

Донные отложения отбирались в летнюю межень (июль – август) 2018 г. с использованием дночерпателя Боруцкого и Петерсена. Каждый образец составлялся из 5 частных проб с однородного участка. Отобранные в полиэтиленовые ёмкости образцы в дальнейшем высушивались до воздушно-сухого состояния. Ситовым методом выделялась для исследования фракция менее 1 мм, затем пробы озолялись при 450 °C. Содержание органического вещества оценивалось по потерям в массе после прокаливания (ППП) воздушно-сухих образцов при температуре 450 °C в течение 8 часов. В процессе исследования были проанализированы образцы отложений, отобранные из водоёмов Гомеля и прилегающих территорий, испытывающих различную антропогенную нагрузку. В образцах определялось содержание тяжёлых металлов атомно-эмиссионным спектральным методом на спектрофотометре PGS-2 в лаборатории аналитического контроля РУП «Белорусский научно-исследовательский геологоразведочный институт».

В качестве исследуемого металла был выбран никель. Несмотря на то, что согласно ранее проведённым исследованиям он не является широко распространённым загрязнителем водных экосистем, однако в незначительных количествах содержится во всех их компонентах. Чаще всего соединения никеля попадают в водоёмы вместе со сточными водами промышленных предприятий. Преимущественно данный металл применяется при изготовлении нержавеющей стали, антикоррозионных покрытий, в качестве побочных продуктов выделяется при горении различных видов топлива, а также используется в машиностроении, чёрной и цветной металлургии.

Статистическая обработка осуществлялась с помощью Microsoft Office Excel 2016. Также были рассчитаны коэффициенты накопления (далее – K_n) изучаемого металла в системах «высшие водные растения – донные отложения» (1) и «высшие водные растения – вода» (2).

Коэффициент накопления элемента – это величина, которая рассчитывается как отношение концентрации элемента в золе водных растений к его содержанию в донных отложениях (воде). Расчет производился по формулам:

$$K_n = \frac{C_x}{C_y}, \quad (1)$$

где K_n – коэффициент накопления; C_x – концентрация металла в высших водных растениях; C_y – концентрация металла в донных отложениях.

$$K_n = \frac{C_x}{C_z}, \quad (2)$$

где K_n – коэффициент накопления; C_x – концентрация металла в высших водных растениях; C_z – концентрация металла в воде.

K_n свидетельствует о наличии факта «контроля» со стороны растений за поступлением загрязнителей в метаболически важные центры и позволяет косвенно судить о степени доступности элемента в среде обитания для растительных организмов и о поведении поллютантов в системах «донные отложения – высшие водные растения» и «вода – высшие водные растения» [9].

Результаты и их обсуждение. При изучении концентрации никеля в донных отложениях водоёмов г. Гомеля максимальное содержание металла определено в образцах оз. Шапор, что составляет 11,7 мг/кг сухой массы (рис.1). Высокое содержание металла отмечено также в донных отложениях озёр Любенское и Володькино – 11,0 и 10,0 мг/кг сухой массы соответственно. Объяснить практически одинаковое высокое содержание никеля в отложениях водоёмов, испытывающих различную антропогенную нагрузку, сложно. Оз. Володькино имеет течение, так как является расширением коренного русла р. Сож, а оз. Любенское принимает поверхностный сток с огородов и подворьев частного сектора города. Хотя водоём и имеет связь с р. Сож, однако в нём практически нет течения. Можно предположить, что в оз. Володькино поступают несанкционированные стоки предприятий, либо соединения никеля поступают в водоём с р. Ипуть, впадающей в оз. Володькино.

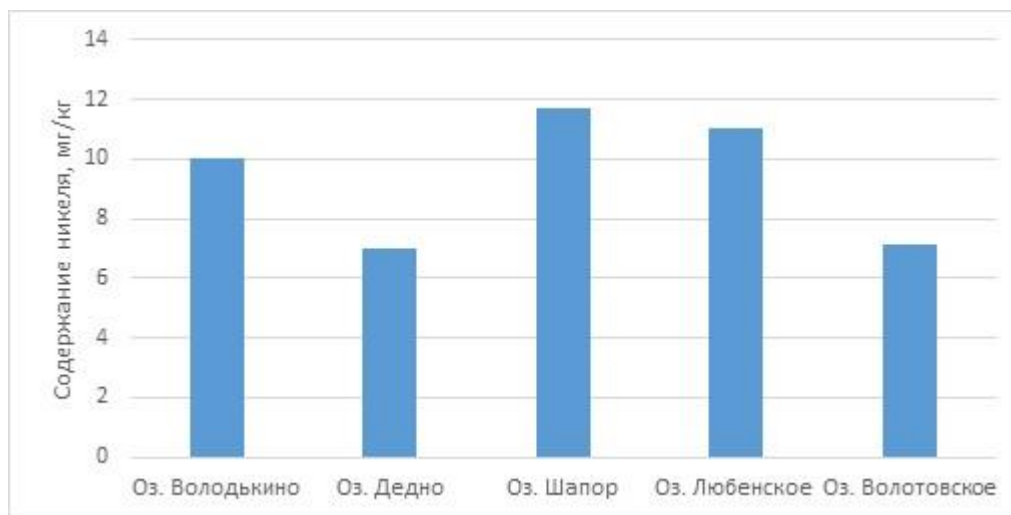


Рисунок 1 – Сравнительный анализ содержания никеля (мг/кг) в донных отложениях изучаемых водоёмов

Минимальная концентрация никеля зафиксирована в донных отложениях озёр Дедно и Волотовское – 7,0 и 7,1 мг/кг сухой массы соответственно. Хотя оз. Дедно имеет высокую антропогенную нагрузку, поскольку связано через земляную дамбу с отстойником, принимающим стоки 11 предприятий г. Гомеля, в водоёме наблюдается относительно невысокое содержание металла. Данный факт можно объяснить тем, что стоки предприятий, поступающие в водоём, содержат соединения никеля в незначительных

количествах, либо земляная дамба является своеобразным барьером, пройдя через который вода очищается от соединений металла.

Оз. Волотовское является полностью замкнутым непроточным водоёмом и расположено в городской зоне отдыха. Несмотря на то, что в водоём не поступают стоки промышленных предприятий, водоём загрязняется поверхностным стоком с автотрассы, близлежащих городских территорий и стройки.

Последовательность водоёмов по содержанию никеля в донных отложениях в порядке убывания можно представить в следующем виде: оз. Шапор > оз. Любенское > оз. Володькино > оз. Волотовское > оз. Дедно.

Результаты анализа проб поверхностных вод на содержание соединений никеля показали, что во всех водоёмах концентрация металла невысокая и составляет 0,001 мг/дм³. Согласно постановлению Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь № 13 от 30.03.2015 «Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов» [8], значения содержания никеля в пробах поверхностных вод всех исследуемых водоёмов не превышают значений ПДК. Поскольку в донных отложениях всех исследуемых водоёмов никель содержится в достаточно высоких концентрациях, можно предположить, что данные водоёмы обладают высокой способностью к самоочищению, когда соединения металла сорбируются донными отложениями, за счёт чего очищаются водные массы водоёмов.

Результаты анализа проб высших водных растений представлены на рисунке 2.

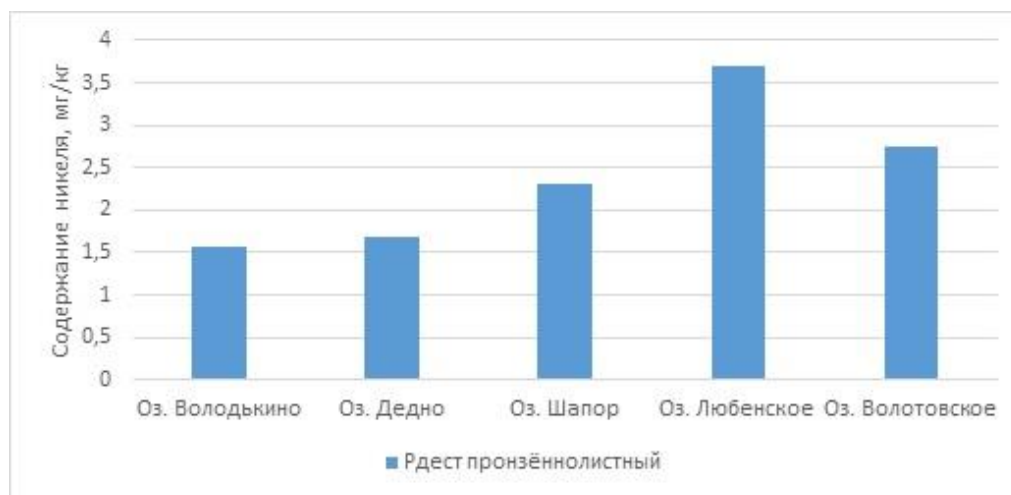


Рисунок 2 – Сравнительный анализ содержания никеля (мг/кг) в высших водных растениях изучаемых водоёмов

Как показывают проведённые исследования, наиболее загрязнены соединениями никеля растения оз. Любенское, где содержание металла в донных отложениях значительное. Концентрация никеля в исследуемых растительных пробах составляет 3,693 мг/кг сухого вещества. Значительное содержание металла и в донных отложениях, и в растениях оз. Любенское говорит о его доступности в донных отложениях для макрофитов. Вероятно, растения данного водоёма поглощают металл из воды и донных отложений, накапливая его в тканях до высоких уровней. Согласно розе ветров, данный водоём находится в зоне воздействия выбросов Гомельского химического завода. Возможно, влажные и сухие отложения, включающие выбросы завода, содержат соединения никеля, что также является причиной высокой концентрации металла в тканях рдеста пронзеннолистного, отобранного в оз. Любенское.

Близкое к максимальному содержание никеля наблюдается также в макрофитах озёр Волотовское и Шапор – 2,750 и 2,299 мг/кг сухого вещества соответственно. В случае с оз. Волотовское ситуация неоднозначна. Несмотря на то, что в донных отложениях содержание никеля относительно низкое, в отобранных пробах высших водных растений концентрация

металла значительная. Данный факт можно объяснить высокой доступностью металла для растений, когда он активно поступает по безбарьерному типу в растительный организм. В донных отложениях оз. Шапор содержится значительное количество никеля, скорее всего в ткани растений металл поступает именно из них.

Наиболее чистыми водоёмами по содержанию никеля в растениях являются озёра Дедно и Володькино. Несмотря на то, что оз. Дедно испытывает значительную антропогенную нагрузку, в донных отложениях никель содержится в небольших количествах. Растения водоёма также не накапливают соединения никеля в значительных концентрациях – 1,672 мг/кг сухого вещества.

Минимальное содержание никеля, 1,578 мг/кг сухого вещества, характерно для макрофитов оз. Володькино. Как в растениях, так и донных отложениях содержание металла незначительное, что свидетельствует об отсутствии металла в стоках, поступающих в водоём. В макрофитах оз. Володькино низкое содержание никеля может быть также обусловлено работой механизмов блокировки или нахождением в донных отложениях соединений изучаемого металла в недоступной для растений форме.

Благодаря данным механизмам некоторые растения способны ограничивать накопление тяжёлых металлов. В чистом водоёме живые организмы накапливают все доступные формы металла, а в загрязнённом водоёме существует предел накопления, после которого поступление токсиканта в организм практически прекращается, однако при достижении определённой концентрации в воде и донных отложениях металла начинает поступать в организм пропорционально воде и донным отложениям. В результате происходит так называемый срыв работы механизма блокировки поступления металла в организм.

Все механизмы можно разделить на две группы:

1). внешние, предотвращающие (ограничивающие) проникновение тяжёлых металлов в клетку, в результате чего растение избегает их токсического действия на внутриклеточные процессы;

2) внутренние, обеспечивающие запуск внутриклеточных механизмов устойчивости.

В случае активной работы данных механизмов растение можно нормально расти и развиваться, даже несмотря на высокий уровень загрязнения окружающей среды. Однако в случае их срыва происходит неконтролируемое поступление металла в макрофит и окружающую его водную среду обитания. В результате данного процесса концентрация накопленного металла может достигать такого уровня, при котором растение начинает погибать [10].

Последовательность водоёмов по содержанию никеля в рдесте пронзённостлистном в порядке убывания можно представить в следующем виде: оз. Любенское > оз. Волотовское > оз. Шапор > оз. Дедно > оз. Володькино.

Доступность металла в донных отложениях и воде, а также его поглощение растениями показывает коэффициент накопления, который рассчитывается по описанным выше формулам [11].

По формуле (1) были рассчитаны коэффициенты накопления изучаемого металла в системе «вышние водные растения – донные отложения». Результаты вычисления данных коэффициентов накопления представлены в таблице 1.

Стоит отметить, что в водоёмах, где донные отложения сильно загрязнены никелем, загрязнены также и растения. Исключения составляют озёра Володькино и Волотовское. В оз. Володькино, несмотря на высокое содержание металла в отложениях, низкое в растениях, что свидетельствует о контроле со стороны растений по поступлению металла с донных отложений. В оз. Волотовское, наоборот, низкое содержание в донных отложениях, но высокое в растениях, что свидетельствует о доступности металла в абиотических компонентах водоёма для растительных организмов.

Водоём	Ni, мг/кг
Оз. Володькино	0,1578
Оз. Дедно	0,2389
Оз. Шапор	0,1965
Оз. Любенское	0,3357
Оз. Волотовское	0,3873

Таблица 1 – Коэффициенты накопления никеля в водоёмах г. Гомеля в системе «высшие водные растения – донные отложения»

Исходя из значений коэффициентов накопления, рассчитанных по соотношению с содержанием металла в донных отложениях, последовательность водоёмов по накоплению никеля в рдесте пронзённolistном в порядке убывания можно представить в следующем виде: оз. Волотовское > оз. Любенское > оз. Дедно > оз. Шапор > оз. Володькино.

При увеличении концентрации никеля в донных отложениях коэффициент накопления металла в растениях уменьшается. Высокое накопление никеля в растениях озёр Володькино, Шапор и Любенское может свидетельствовать о срыве механизма блокировки поступления металла в организм, в результате чего произошло его бесконтрольное поступление. Можно также предположить, что в данных водоёмах соединения никеля в абиотических компонентах находится в доступных для растений формах.

По формуле (2) были рассчитаны коэффициенты накопления изучаемого металла в системе «высшие водные растения – вода». Результаты вычисления данных коэффициентов накопления представлены в таблице 2.

Водоём	Ni, мг/кг
Оз. Володькино	1578
Оз. Дедно	2389
Оз. Шапор	1965
Оз. Любенское	3357
Оз. Волотовское	3873

Таблица 2 – Коэффициенты накопления никеля в водоёмах г. Гомеля в системе «высшие водные растения – вода»

В воде содержание никеля одинаково для всех водоёмов, однако коэффициент накопления в растениях имеет значительные различия. Максимальное количество металла накапливают растения озёр Любенское и Волотовское, где коэффициенты накопления в системах «высшие водные растения – донные отложения» и «высшие водные растения – вода» высокие. Минимальное количество никеля накапливают растения оз. Володькино, где коэффициенты накопления в двух изучаемых системах низкие. Неоднозначная ситуация в озёрах Дедно и Шапор. В оз. Дедно коэффициент накопления в системе «высшие водные растения – донные отложения» достаточно высокий, а коэффициент накопления в системе «высшие водные растения – вода» низкий. В оз. Шапор наоборот, коэффициент накопления в системе «высшие водные растения – донные отложения» низкий, а коэффициент накопления в системе «высшие водные растения – вода» почти максимально высокий. Полученные данные свидетельствуют о разных путях поступления металла в растения одного вида в разных водоёмах с различным характером антропогенной нагрузки.

Исходя из значений коэффициентов накопления, рассчитанных по соотношению с содержанием металла в воде, последовательность водоёмов по накоплению никеля в рдесте пронзённolistном в порядке убывания можно представить в следующем виде: оз. Волотовское > оз. Любенское > оз. Дедно > оз. Шапор > оз. Володькино.

Заключение. Проведённые исследования показали, что на уровень содержания тяжёлых металлов в макрофитах могут влиять одновременно несколько факторов: физиологические особенности водных растений, степень антропогенного воздействия на водоём, химические свойства металлов, а также различные условия окружающей среды.

При проведении исследований установлено, что одновременно высокое содержание никеля в донных отложениях и растениях характерно для озёр Шапор и Любенское, имеющих различную антропогенную нагрузку, минимальное – для оз. Дедно, имеющего прямой контакт с источником сточных вод предприятий города. Данный факт подтверждает наличие механизма блокировки поступления металла в ткани живых организмов, в частности, растений. Объяснить факт высокого загрязнения растений и донных отложений оз. Любенское, не испытывающего высокую антропогенную нагрузку, в настоящее время сложно, что требует дальнейших исследований. Анализируя данные коэффициентов накопления, стоит отметить, что в водоёмах со значительным загрязнением донных отложений, коэффициенты накопления максимальные или близки к максимальным, что говорит о бесконтрольном поступлении металла в организм растений, которое наблюдается в случае нарушения барьерной функции организма при превышении пороговой концентрации в компонентах окружающей среды. Необходимо проводить дополнительные исследования загрязнения экосистем, не испытывающих видимую антропогенную нагрузку, для создания рекомендаций по использованию водоёмов в целях рекреации.

Несмотря на одинаковое содержание никеля в воде всех изучаемых водоёмов, коэффициенты накопления в системе «высшие водные растения – вода» сильно изменяются и колеблются в пределах 1578 – 3693 мг/дм³. Можно предположить, это связано с тем, что пути поступления никеля в растения одного вида сильно различаются в разных водоёмах: в одних случаях соединения металла поступают из воды, в других – из донных отложений. Ряды водоёмов, построенные по содержанию никеля в растениях, а также по его накоплению из воды и донных отложений практически не отличаются по положению, что указывает на возможность использования макрофитов как индикаторов загрязнения водных экосистем тяжёлыми металлами.

Список литературы:

1. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжёлые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния / пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 288 с.
2. Содержание металлов в высших водных растениях в небольшом сибирском водохранилище / Е.А. Иванова [и др.] // Сибирский экологический журнал. – 2010. – № 4. – С. 485 – 495.
3. Bioaccumulation of heavy metals by submerged macrophytes: looking for hyperaccumulators in eutrophic lakes / W. Xing [et al.] // Environmental science and technology. – 2013. – № 47. – P. 4695 – 4703.
4. Heavy metal accumulation in common aquatic plants in rivers and lakes in the Taihu Basin / L. Bai [et al.] // International journal of environmental research and public health. – 2018. – № 15. – P. 2857 – 2869.
5. Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР: методы изучения. – Ленинград: Наука, 1981. – 187 с.
6. Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н. Физиология высших водных растений. – Киев: Наукова думка, 1988. – 188 с.
7. Макаренко Т.В. Загрязнение высших водных растений водоемов и водотоков Гомеля и прилегающих территорий // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2013. – № 5 (80). – С. 112–121.
8. Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов [Электронный ресурс]: постановление Министерства природных ресурсов и охраны

окружающей среды Республики Беларусь, 30 марта 2015 г. № 13 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21529808&p1=1> (дата обращения: 06.11.2019).

9. Орлов Л.С. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. – М.: Высшая школа, 2002. – 334 с.

10. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжёлым металлам: учебное пособие / Институт биологии КарНЦ РАН. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2011. – 77 с.

11. Малиновский Д.Н., Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П. Миграция загрязняющих веществ в водных объектах районов горных разработок (на примере апатитовых месторождений) // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 1. – С. 72 – 81.

