



УДК: 628.5;504.5;543.42.

Сабина МУСАКАЕВА,

Докторант, Джизакский педагогический университет, Джизах, Узбекистан

E-mail: musakaevsabina1@gmail.com

Зулайхо СМАНОВА,

Д.х.н., профессор, Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

Камила РАШИДОВА,

Д.х.н., доцент, Джизакский государственный педагогический университет, Джизах, Узбекистан

Зухра ЯХШИЕВА,

Д.х.н., профессор, Джизакский государственный педагогический университет, Джизах, Узбекистан

Нилуфар УМИРОВА,

PhD, доцент, преподаватель Гулистанского государственного университета, Гулистан, Узбекистан

На основе рецензии С.Н. Облобердиева, доцента Янгйерского филиала Ташкентского института химической технологии

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ КАК ФАКТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аннотация

В статье рассмотрена проблема загрязнения природных вод тяжёлыми металлами как одного из наиболее опасных факторов антропогенного воздействия на окружающую среду. Приведена характеристика тяжёлых металлов, их классификация, формы существования и миграции в водных экосистемах, а также нормативы предельно допустимых концентраций. Особое внимание уделено биологическим методам очистки воды, включая биосорбцию и фиторемедиацию. Показана эффективность использования высших водных растений и микроорганизмов для удаления ионов марганца, свинца, хрома, железа и стронция. Обоснована перспективность комбинированных биосорбционно-фиторемедиационных технологий для очистки природных и сточных вод.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, загрязнение вод, биосорбция, фиторемедиация, макрофиты, ПДК.

HEAVY METALS AS A FACTOR OF ENVIRONMENTAL POLLUTION

Annotation

The article addresses the problem of natural water contamination by heavy metals as one of the most hazardous factors of anthropogenic impact on the environment. The main sources of heavy metal input into aquatic ecosystems, their classification, physicochemical forms, and migration patterns in the hydrosphere are analyzed. Regulatory standards for maximum permissible concentrations (MPC) in different categories of water use are discussed. Special attention is given to biological water treatment methods, including biosorption and phytoremediation. The effectiveness of higher aquatic plants and microorganisms in removing manganese, lead, chromium, iron, and strontium ions is substantiated. The перспективность использования combined biosorption-phytoremediation technologies for the treatment of natural and wastewater is demonstrated.

Keywords: heavy metals; water pollution; biosorption; phytoremediation; macrophytes; maximum permissible concentration; water treatment.

OG'IR METALLAR ATROF-MUHIT IFLOSLANISHINING OMILI SIFATIDA

Annotatsiya

Ushbu maqolada tabiiy suvlarning og'ir metallar bilan ifloslanishi muammosi atrof-muhitga antropogen ta'sirining eng xavfli omillaridan biri sifatida ko'rib chiqiladi. Unda og'ir metallarning xususiyatlari, ularning tasnifi, suv ekotizimlarida mavjud bo'lish shakllari va migratsiyasi hamda ruxsat etilgan maksimal konsentratsiya standartlari keltirilgan. Suvni tozalashning biologik usullariga, jumladan, biosorbsiya va fitoremediatsiyaga alohida e'tibor qaratilgan. Marganets, qo'rg'oshin, xrom, temir va stronsiy ionlarini olib tashlash uchun yuqori suv o'simliklari va mikroorganizmlaridan foydalanish samaradorligi bayon etilgan. Tabiiy va oqava suvlarni tozalash uchun biosorbsiya va fitoremediatsiya texnologiyalarining birgalikdagi salohiyati asoslab berilgan.

Kalit so'zlar: og'ir metallar, suv ifloslanishi, biosorbsiya, fitoremediatsiya, makrofitlar, MREK.

Введение. В современной экологии одной из наиболее острых тем остается загрязнение гидросферы тяжёлыми металлами (ТМ). Бурное развитие металлургии, горнодобывающей и химической промышленности ведет к постоянному росту объема стоков, насыщенных ионами металлов. В отличие от органики, ТМ не подвержены разложению; они лишь трансформируют свою форму и валентность, что приводит к их долгосрочному накоплению в пищевых цепях и пагубному влиянию на здоровье людей [1]. Под термином «тяжёлые металлы» понимают группу элементов с высокой плотностью и атомным весом более 50 а.е.м. (таких как Cr, Mn, Cu, Zn, Pb и др.), которые проявляют токсичные свойства даже в минимальных дозах. Особую тревогу вызывает состояние ирригационных каналов, которые аккумулируют сельскохозяйственные смывы и промышленные выбросы. Накопление в воде Pb, Cd, Cu и Zn создает угрозу безопасности агропродукции, так как металлы легко мигрируют по цепочке «почва - растение» [2].

Определяющими признаками тяжёлых металлов являются токсичность в низких концентрациях и способность к биоаккумуляции. [3].

В современных условиях одной из остроактуальных экологических проблем являются деградация ирригационных систем которые подвержены антропогенному загрязнению ТМ в результате сельскохозяйственного стока и промышленных выбросов, ирригационные каналы является ключевой транспортной артерией для сельского хозяйства. Однако смыл минеральных удобрений и сточные воды приводят к накоплению в его экосистеме токсичных элементов: свинца (Pb), кадмия (Cd), меди (Cu) цинка (Zn) марганца (Mn), хрома (Cr), железа (Fe) и стронция (Sr). Использование такой воды для орошения создает риски перехода металлов в систему «почва - растение», что напрямую угрожает экологической безопасности сельскохозяйственной продукции и здоровью населения [4]. Водные растения выступают в роли естественных биоаккумуляторов, концентрируя металлы в дозах, значительно превышающих их содержание в воде. Водные растения накапливают металлы путем пассивной адсорбции на поверхности клеточных стенок (благодаря наличию карбоксильных и сульфатных групп) и активного поглощения внутрь клетки. Способность водорослей к биоаккумуляции делает их идеальными объектами для биомониторинга и эффективными кандидатами для методов биоремедиации. Биосорбция стала перспективной «зеленой» альтернативой, использующей естественную способность биомассы связывать ионы металлов. [5]. Одним из распространенным видом растения в водоёмах Узбекистана является роголистник (*Ceratophyllum demersum*) – простое, но универсальное прудовое растение.

Роголистник признан одним из самых эффективных инструментов фиторемедиации. Это многолетнее травянистое растение, которое развивается в толще воды. Благодаря своей структуре и метаболизму, способен поглощать и удерживать высокие концентрации токсичных металлов, он прекрасно поглощает нитраты и фосфаты из воды, поскольку у роголистника нет корней, поглощение происходит всей поверхностью растения, преимущественно через листья, путем пассивного и активного транспорта ионов из воды, накапливая их в тканях, что является частью его адаптации к разным условиям, хотя механизм включает сложную клеточную и физиологическую регуляцию, на клеточных стенках растения находятся функциональные группы (карбоксильные, гидроксильные и аминогруппы), которые притягивают ионы металлов как «магниты», связывание металлов белками и их захоронение в вакуолях для минимизации токсичности, особенно в условиях загрязнения [6]. Роголистник является гипераккумулятором, то есть может накапливать металлы в дозах, во много раз превышающих их концентрацию в окружающей среде. Свинец (Pb): Растение удаляет до 95–96% свинца из воды. Максимальное накопление в тканях может достигать 17 000 мкг/г. Кадмий (Cd): Роголистник крайне эффективно извлекает кадмий даже при низких концентрациях (фактор накопления более 3000). Медь (Cu) и Цинк (Zn): Растение активно впитывает эти элементы, достигая максимальной адсорбционной способности до 6,17 мг/г для меди и 13,98 мг/г для цинка. Хром (Cr), Никель (Ni) и Кобальт (Co). Также эффективно удаляются из воды, причем кобальт часто поглощается даже активнее других металлов. Обитает роголистник в пресных водоемах, преимущественно со стоячей водой, что делает его незаменимым для очистки пруда. [7].

Миграция и формы существования тяжёлых металлов в водной среде

Соединения тяжёлых металлов загрязняют атмосферу, почву и водные объекты, мигрируют по биогеохимическим циклам и поступают в организм человека через пищевые цепи. Почва является важнейшим аккумулятором ТМ и источником их вторичного поступления в поверхностные и подземные воды. Установлено, что металлы сравнительно быстро накапливаются в почве, но удаляются из неё крайне медленно, что определяет длительный характер загрязнения [8].

Ионы металлов являются естественными компонентами природных вод и могут находиться в растворённой, коллоидной и взвешенной формах. Истинно растворённые формы представлены свободными ионами, гидроксокомплексами и комплексами с органическими и неорганическими лигандами. Формы существования металлов зависят от значений pH, окислительно-восстановительного потенциала (Eh), температуры и содержания органических веществ.

Многие тяжёлые металлы образуют устойчивые хелатные комплексы с гумусовыми веществами, что обеспечивает их высокую миграционную способность в поверхностных водах. Переход металлов в комплексную форму может сопровождаться изменением их токсичности и биологической доступности. Так, хелатные формы меди, кадмия и ртути, как правило, менее токсичны по сравнению со свободными ионами [9].

Повышение концентрации тяжёлых металлов в водоёмах часто связано с закислением среды. Кислотные осадки способствуют снижению pH и переходу металлов из сорбированного состояния в растворённое, что увеличивает их подвижность и экологическую опасность [10].

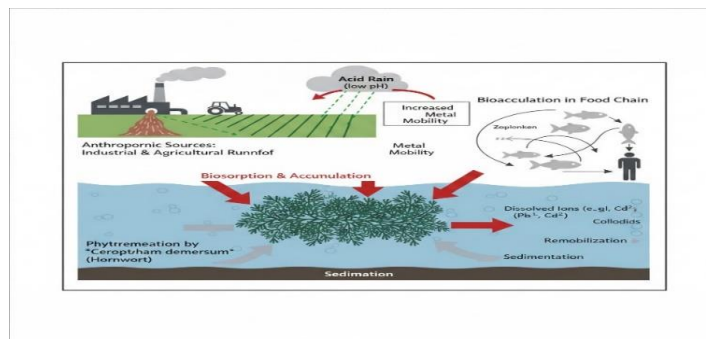


Рисунок 1. Пути миграции тяжёлых металлов в биосфере [11].

Нормы содержания тяжёлых металлов в воде:

Для оценки безопасности воды используются показатели предельно допустимых концентраций (ПДК), устанавливаемые по токсикологическому, органолепическому, общесанитарному и рыбохозяйственному критериям. Превышение ПДК может оказывать негативное воздействие на здоровье населения, процессы самоочищения водоёмов и состояние водных экосистем.

Таблица 1 — Предельно допустимые концентрации некоторых металлов в водоёмах [12].

Металл	ПДК (мг/дм ³)	Характер воздействия
Ртуть (Hg)	0.0005	Высокая токсичность
Кадмий (Cd)	0.001	Высокая токсичность
Свинец (Pb)	0.003–0.03	Санитарно-токсикологический
Хром (Cr VI)	0.05	Канцероген
Марганец (Mn)	0.1	Органолептический

Биосорбция как метод очистки воды: Биосорбция основана на способности биологических материалов связывать ионы металлов за счёт функциональных групп клеточных стенок. В качестве биосорбентов применяются бактерии, грибы, водоросли и высшие растения. Метод эффективен при концентрациях металлов 1–100 мг/л и характеризуется низкой стоимостью и экологической безопасностью. [13].

Метод фиторемедиации позволяет очищать водоемы *in situ* (на месте). Помимо роголистника, отличные результаты показывает водный гиацинт (*Eichhornia crassipes*). В ходе десятидневных испытаний он снизил содержание меди в 8,5 раз, а кадмия - в 6 раз. Также макрофиты эффективны в борьбе со стронцием, который по химической природе схож с кальцием и опасен для костных тканей человека. [14].

Очистка воды от ионов стронция: Стронций относится ко 2 классу опасности и поступает в водоёмы преимущественно из месторождений целестина. По химическим свойствам он близок к кальцию, однако его накопление в организме приводит к поражению костной ткани. Исследования показывают, что макрофиты способны эффективно аккумулировать ионы стронция, что делает фиторемедиацию перспективной альтернативой традиционным методам очистки воды [15].

Заключение и перспективы. Загрязнение водных объектов тяжёлыми металлами в условиях Узбекистана, особенно в ирригационных системах, представляет серьёзную экологическую и санитарную проблему. Накопление Pb, Cd, Cu, Zn, Mn, Cr, Fe и Sr формирует риски перехода металлов в систему «вода - почва - растение - человек».

Установлено, что биологические методы очистки обеспечивают высокую эффективность удаления металлов: степень извлечения свинца достигает 95–96 %, снижение концентрации кадмия - в 6 раз, меди - в 8,5 раза, цинка - более чем в 5 раз. Адсорбционная способность по Cu составляет до 6,17 мг/г, по Zn - до 13,98 мг/г; фактор накопления Cd превышает 3000.

Практическая значимость заключается в возможности внедрения биосорбционно-фиторемедиационных технологий для очистки ирригационных вод Узбекистана с достижением концентраций, близких к нормативам ПДК, при низких эксплуатационных затратах. Перспективным является создание адаптированных региональных систем биологической очистки с контролем вторичного загрязнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Загрязнение водных объектов тяжелыми металлами и методы их очистки / А. В. Малыгин, В. В. Кирсанов. - Текст: электронный // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. - 2011. - № 4. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zagryaznenie-vodnyh-obektov-tyazhelyimi-metallami-i-metody-ih-ochistki>.
2. Багров, В. В. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов / В. В. Багров, А. П. Глыбина. - Текст: электронный // eLIBRARY.RU: [научная электронная библиотека]- URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18833957>.
3. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. - 2-е изд., доп. - Москва: Гидрометеиздат, 1984. - 560 с.
4. Голованов, А. И. Мелиорация земель: учебник для вузов / А. И. Голованов, И. П. Айдаров, М. С. Григоров; под редакцией А. И. Голованова. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: КолосС, 2011. — 824 с.
5. Пранджишвили, Д. А. Биосорбция тяжелых металлов: механизмы и перспективы использования биомассы / Д. А. Пранджишвили. - Текст: непосредственный // Биотехнология. — 2018. — Т. 34, № 2. — С. 15–28.
6. Хайдарова, Г. Д. Роль макрофитов в процессах самоочищения ирригационных каналов / Г. Д. Хайдарова, Б. А. Тошматов. - Текст: непосредственный // Вестник Национального университета Узбекистана. - 2021. - № 2. - С. 45–50.
7. 10. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения / А. Ф. Титов, В. В. Таланова, Н. М. Казнина, Г. Ф. Лайдинен. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. — 194 с.
8. Мотузова, Г. В. Соединения тяжелых металлов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг / Г. В. Мотузова. — Москва: Изд-во МГУ, 2013. — 208 с.
9. Никаноров, А. М. Гидрохимия: учебник / А. М. Никаноров. — 2-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. - 444 с.
10. Моисеенко, Т. И. Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия / Т. И. Моисеенко. - Москва: Наука, 2003. - 276 с.
11. Малыгин, А. В. Загрязнение водных объектов тяжелыми металлами и методы их очистки / А. В. Малыгин, В. В. Кирсанов. - Текст: непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2011. - № 4. - С. 86–100.
12. СанПиН РУз № 0318-15. Гигиенические нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. - Ташкент, 2015.
13. Багров, В. В. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов / В. В. Багров, А. П. Глыбина. - Текст: непосредственный // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». - 2012. - Спец. вып. № 2. - С. 195-201.
14. Шораева, К. А. Использование водного гиацинта (*Eichhornia crassipes*) в процессе фиторемедиации техногенно загрязненных вод / К. А. Шораева // Известия НАН РК. Серия биологическая и медицинская. - 2018.
15. Гладких, А. А. Исследование макрофитов с целью применения для очистки природных вод от ионов стронция / А. А. Гладких, С. В. Пьянкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2021. - № 1 (41). - С. 106-120.