

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение “Средняя
общеобразовательная школа №121 г. Челябинска”

Очистка воды от ионов меди при помощи макрофитов

Выполнила: Максимова Анна,
11 класс, МБОУ «СОШ № 121 г.
Челябинска»/ МБУДО «ЦДЭ г. Челябинска»

Руководитель:
Маркитан Семен Васильевич, учитель химии
МБОУ «СОШ № 121 г. Челябинска»

Научный консультант: Лисун Наталья
Михайловна,
к.п.н., доцент, учитель биологии
МБОУ «СОШ № 121 г. Челябинска»

Челябинск, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Общие сведения о загрязнении ионами меди окружающей среды и методы очистки	5
1.1 Медно-порфировые провинции и зоны Челябинской области	5
1.2 Макрофиты, их характеристика	6
Глава 2. Зависимость степени очистки воды от времени пребывания макрофитов в загрязненной воде и насыщения воды кислородом.....	8
2.1 Разработка модельного эксперимента для очистки воды от ионов меди с использованием макрофитов	8
Заключение	13
Список используемых источников.....	14
Приложение 1	16
Приложение 2	18
приложение 3	19
Приложение 4	20

ВВЕДЕНИЕ

Медь является одним из немногих металлов, широко освоенным человеком еще с древних времен, который используется для изготовления кабелей, проводов, труб и т.д. Использование меди в различных отраслях промышленности неизбежно приводит к образованию стоков, где медь присутствует как в ионной форме, так и в виде сложных, трудно разрушаемых неорганических комплексов.

В современных условиях, когда антропогенная нагрузка на экосистемы постоянно растет, а их устойчивость имеет определенные пределы, большой интерес вызывают различные биологические методы очистки окружающей среды, в том числе и водоемов. Эти методы считаются разумными и безопасными, так как основаны на естественных механизмах, встречающихся в природе. Одним из таких методов является фиторемедиация – очищение окружающей среды при помощи живых растений. Фитоэкстракция подразумевает использование растений для извлечения загрязняющих веществ из окружающей среды.

Примерами таких естественных очистителей являются макрофиты, которые, известны специалистам как замечательное средство для очистки водоемов. Особая ценность этих растений заключается в том, что они одинаково хорошо очищают воду от всех основных загрязнителей, попадающих в источники в результате техногенной деятельности людей, органических веществ, солей и ионов тяжелых металлов.

В настоящей работе рассмотрена способность макрофитов очищать воду от ионов меди.

Цель исследования – изучение эффективности использования макрофитов при очистке воды от ионов меди.

Объект исследования: исследуемая вода.

Предмет исследования: содержание ионов меди в исследуемой воде.

Гипотеза исследования – при загрязнении воды ионами меди и аэрации кислорода воздуха макрофиты видов ряска, роголистник и элодея способствуют снижению содержанию ионов меди.

Задачи исследования:

1. Описать источники меди в водоемах Челябинской области;
2. Определить возможность использования макрофитов для очистке воды;
3. Провести модельный эксперимент по очистке воды от ионов меди с использованием макрофитов.

Методы исследования: изучение и анализ научной литературы, проведение лабораторного эксперимента.

Значимость моей исследовательской работы заключается в изучении, сравнении степени очистки воды от концентрации ионов меди, времени пребывания макрофитов в загрязненной воде и насыщения воды кислородом. Данная технология очистки воды может быть применена для улучшения

экологического состояния естественных водоёмов, а также при создании искусственных водоемов, например, прудов на парковых территориях.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАГРЯЗНЕНИИ ИОНАМИ МЕДИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

1.1 Медно-порфировые провинции и зоны Челябинской области

В настоящее время перспективы выявления медно-порфировых месторождений оцениваются достаточно высоко. Приоритетным для их поисков и оценки является Уральский регион [5]. Известными месторождениями региона являются: Михеевское, Томинское, Еленовское (Рисунок 1). Данные типы залежей меди наблюдаются в среднем ниже глубины 50-55 м. Следовательно, данные рудники приводят к серьезным нарушениям гидробиологического режима водных объектов. В результате вода характеризуется повышенной минерализацией, кислотностью и превышением фоновых концентраций по металлам на несколько порядков.

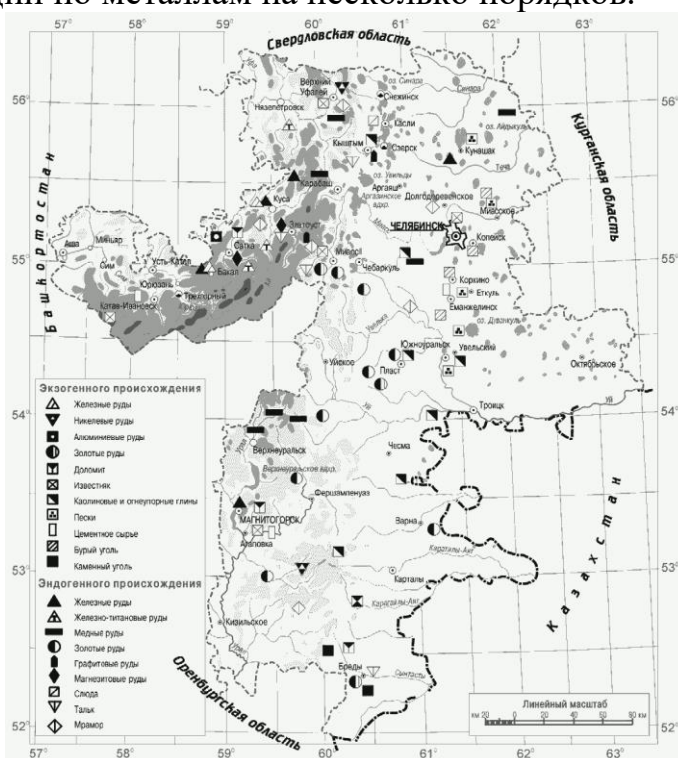


Рисунок 1. Топографическая карта Челябинской области

Загрязнение окружающей среды медью происходит в результате деятельности человека и природных источников [7]. При добыче меди в шахтах образуется пыль, богатая металлом, и ветер может разносить ее по всему участку добычи. Компании-производители, работающие с медью при производстве металла, электроприборов, пестицидов, фунгицидов и других продуктов, содержащих медь, часто выпускают загрязненную воду в дренажную систему, что приводит к образованию ручьев и других водоемов. Использование пестицидов, фунгицидов, использующий этот металл, также вносит больше соединений меди в окружающую среду и может повлиять на людей, потребляющих немывтые фрукты или овощи, опрысканные такими

пестицидами. В зданиях медь, используемая в водопроводе, постепенно растворяется и добавляет металл в систему водоснабжения. Другие источники загрязнения медью включают сжигание ископаемого топлива, отработанные моторные масла, краску и износ тормозных колодок [3].

Избыток меди в почве создает токсичную среду для большинства микроорганизмов, таких как бактерии. Токсичность меди в почве препятствует минерализации питательных веществ, таких как фосфор и азот, поскольку металл связывается с минералами и органическими веществами. Избыток меди в воде оказывает неблагоприятное воздействие на водную флору и фауну, нанося ущерб пресноводным организмам.

1.2 Макрофиты, их характеристика

Макрофиты — это водные цветковые растения и некоторые высшие водоросли. Качественный и количественный состав макрофитов тесно связан с общими экологическими условиями водоемов, устройством их котловин, химическим составом воды, характером донных отложений. Занимая прибрежную зону, именно макрофиты принимают на себя и усваивают основные сбросы биогенных веществ с водосброса [6].

Ряска — это небольшой и свободно плавающий водный многолетник, который в сочетании образует ковер на поверхности воды. Он имеет яркий светло-зеленый цвет с цветками, дающими маленькие плоды, каждый из которых содержит до пяти семян. Различные виды распространились по всем уголкам планеты. Некоторые из них произрастают на территории России. Любая разновидность устойчива к холоду. Произрастает только в тех местах, где отсутствует сильное течение.

Ряска распространяется по всему водоему плотным покрытием. Приносит пользу тем, что защищает водоем от проникновения солнечных лучей, снабжает кислородом, а также является кормом для рыб. Однако преднамеренно это растение не заводят в прудах, потому что потом сложно от него избавиться. А вот в аквариумах его можно разводить для использования в лечебных целях.

Клеточная стенка ряски состоит из полимерных веществ, таких как целлюлоза и альгинаты. Эти вещества обладают химическими свойствами, позволяющими фиксировать ионы меди на поверхности и внутри клеточной стенки. Также ряска имеет способность выполнять ионообменные процессы, позволяющие обменивать ионы меди с окружающей средой. В результате процесса, ионы меди поглощаются ряской, а другие ионы, такие как калий, натрий или кальций, могут высвободиться из клеток ряски [2].

Элодея (Elodea), род растений семейства водокрасовых. Многолетние в одные травы, полностью погруженные, прикрепленные к грунту. Листья в мутовках по 3–7, цельные, продолговатые, по краю мелкозубчатые. Цветки одиночные, пазушные, в основании с трубчатым покрывалом, обополюе или раздельнополюе, бледно-розовые. Выносятся на поверхность воды с

помощью гипантия – тонкой длинной трубки, напоминающей цветоножку. В России 2 инвазионных вида, в том числе элодея канадская, или водяная чума (*Elodea canadensis*), быстро заполняющая водоём. В Евразии представлена только женскими растениями, размножающимися вегетативно частями побегов, которые разносятся водой и укореняются. Служит кормом для скота, рыб, водоплавающих птиц, способна накапливать радиоизотопы (пригодна для очистки воды).

Элодея канадская способна поглощать из грунта ионы тяжёлых металлов, в том числе таких высокотоксичных и радиоактивных, как медь, цинк, никель. Поглощение ионов тяжелых металлов элодеей осуществляется за счет выделения элодеей органических веществ, таких как аминокислоты и фенольные соединения, которые способны образовывать комплексы с ионами меди, что позволяет эффективно удерживать медь в тканях растения. Также поверхность клеток элодеи содержит ряд активных участков, привлекающих ионы меди и удерживающих их на поверхности растения.

Роголистник (*Ceratophyllum*)- это многолетняя водоросль, которая крепится ко дну стеблями или свободно существует в воде. У него в качестве корней выступают ризоидные ветви стебля. Минеральные вещества поглощаются всей поверхностью растения, в стеблях которого происходит накопление крахмала. Листья напоминают елочку, в них содержится известь. Цветки мелкие, около 0.2 см. Это растение уникально тем, что опыление происходит под водой. Его плод похож на орешек с небольшими шипами.

В природе он является отличным кормом для рыб и водоплавающих птиц. Комфортно взаимодействует со всеми подводными обитателями. Ветви покрывает толстая жироподобная пленка (кутикула), которая защищает их от повреждений [4].

Роголистник способен аккумулировать ионы меди в своих тканях, особенно в корневой системе и листьях. Растение обладает механизмами активного транспорта, которые позволяют переносить ионы меди из воды внутрь клеток и сохранять их в тканях.

ГЛАВА 2. ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ МАКРОФИТОВ В ЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДЕ И НАСЫЩЕНИЯ ВОДЫ КИСЛОРОДОМ

2.1 Разработка модельного эксперимента для очистки воды от ионов меди с использованием макрофитов

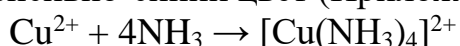
Аквариум – это модель пресного водоема, где происходят почти все биологические процессы, свойственные пресным водоемам. Аквариум считается экосистемой, потому что в нем есть все ее компоненты – это воздух, вода, почва, производители, потребители, разрушители [1].

Для проведения эксперимента по очистке воды при помощи макрофитов нам необходимо было частично воссоздать условия природного водоема. Для этого нами были взяты: «аквариумы» - тара для воды с необходимым литражом (3 л), специализированные фильтры для подачи кислорода (чтобы проводился эксперимент без подачи кислорода). Поскольку грунт представляет собой рыхлые осадочные горные породы, для чистоты проведения эксперимента было решено отказаться от его применения, т. к. грунт мог выступить в данной системе в роли адсорбента и поглотить часть ионов меди.

В качестве водной растительности нами были выбраны следующие макрофиты: ряска, элодея и роголистник, потому что, исходя из литературных источников, именно у этих растений отчается высокая способность к поглощению ионов тяжелых металлов. А также по сравнению с остальными водными растениями они имеют высокие показатели предельной концентрации ионов меди: ПДК ионов меди II для ряски и элодеи составляет 1 мг/л, для роголистника 0,5 мг/л.

Для проведения эксперимента было необходимо загрязнить анализируемую воду ионами меди, для этого мы использовали медный купорос. В анализируемые пробы воды нами заранее были внесены ионы меди II в концентрации 0,3 мг/л и 0,5 мг/л (предельно допустимая концентрация ионов меди для роголистника) для выявления зависимости степени отчистки воды от концентрации загрязняющего вещества.

Перед началом проведения опыта нами был построен калибровочный график зависимости оптической плотности раствора медного купороса от концентрации в нём ионов меди (Приложение 2). Аммиачный метод основан на образовании ионом Cu^{2+} с аммиаком комплекса $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, окрашенного в интенсивно-синий цвет (Приложение 1).



Окраска его достаточно устойчива, колориметрировать раствор можно с помощью фотоэлектрического колориметра.

По результатам построения калибровочного графика была выявлена закономерность: чем выше в растворе концентрация ионов железа, тем выше показатель оптической плотности (Приложение 2).

После построение калибровочного графика, в заранее приготовленный раствор пентагидрата сульфата меди II (медного купороса) с концентрациями ионов меди (II) равными 0,3 мг/л и 0,5 мг/л были помещены макрофиты.

Очистка воды при помощи макрофитов осуществлялась в 24 образцах раствора пентагидрата сульфата меди II (медного купороса):

- 1) с концентрациями ионов меди (II) равными 0,3 мг/л и 0,5 мг/л;
- 2) с аэрацией воды и без нее.

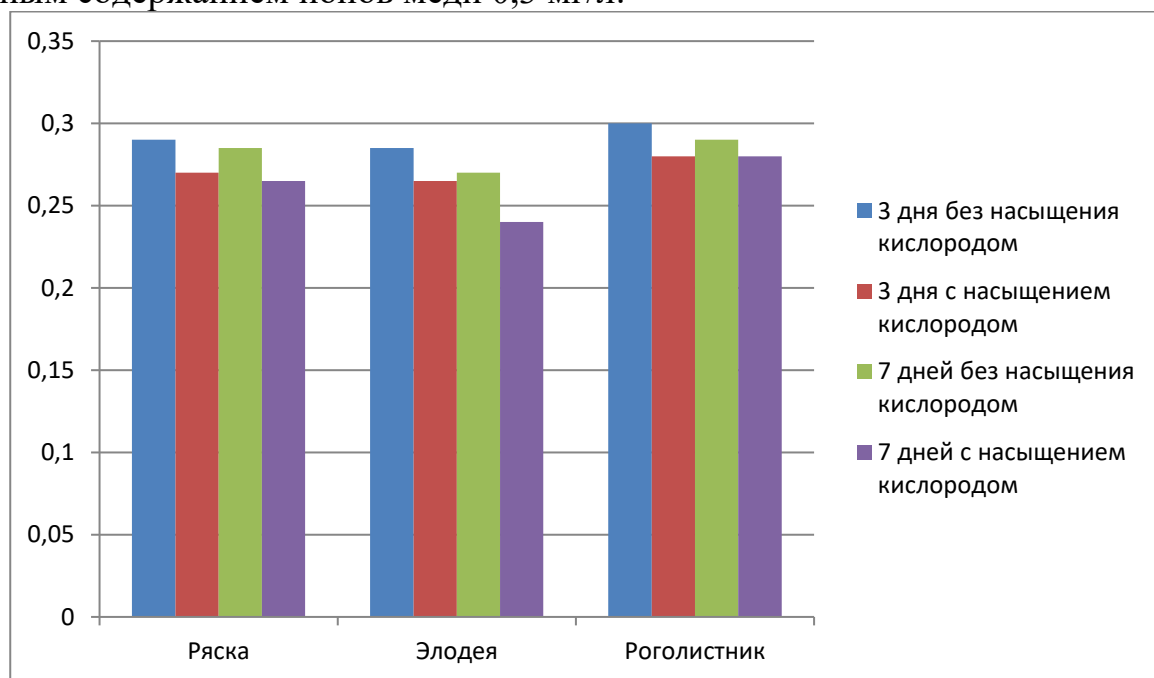
Контрольными точками по времени стали 3 и 7 дней.

По истечению установленного времени пребывания макрофитов в растворе в пробах была измерена оптическая плотность.

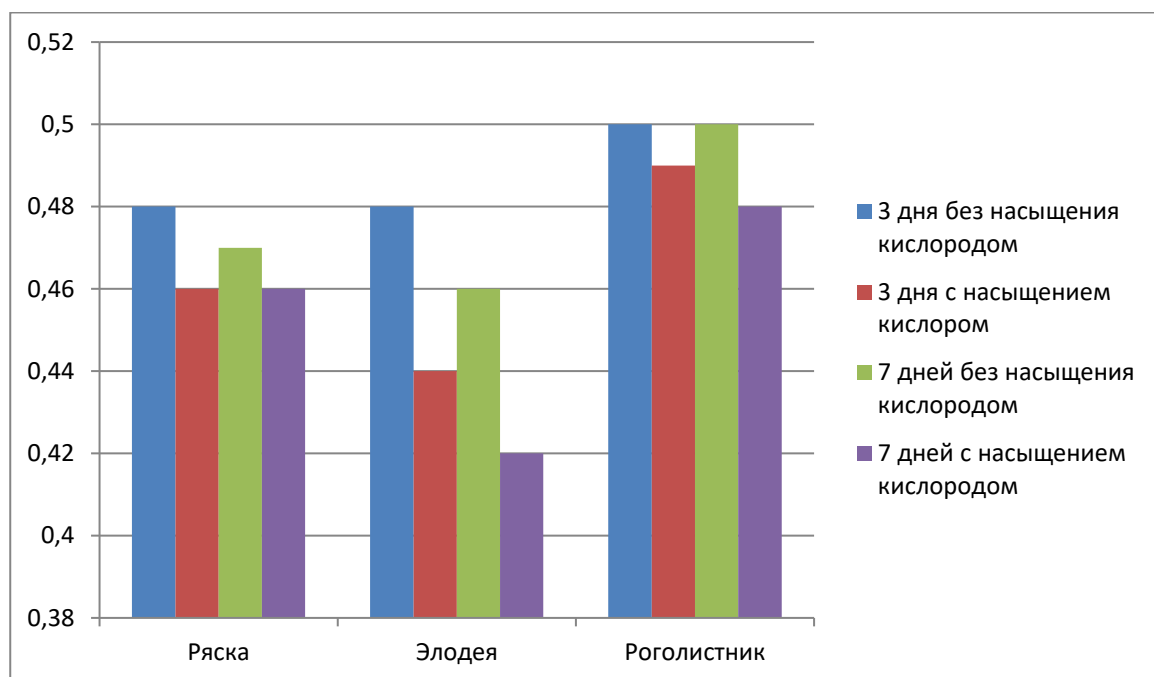
2.2 Результаты модельного эксперимента

Результаты измерения оптической плотности и содержания ионов меди в растворах после присутствия макрофитов (Приложение 3).

Изменение концентрации ионов меди в модельном эксперименте с исходным содержанием ионов меди 0,3 мг/л:



Изменение концентрации ионов меди в модельном эксперименте с исходным содержанием ионов меди 0,5 мг/л:



По результатам эксперимента мы можем заметить, что значение оптической плотности закономерно уменьшается, следовательно, концентрация ионов меди в растворе уменьшается. По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что эффективность удаления ионов меди из раствора зависит от времени пребывания макрофитов в загрязненной воде и насыщения воды кислородом.

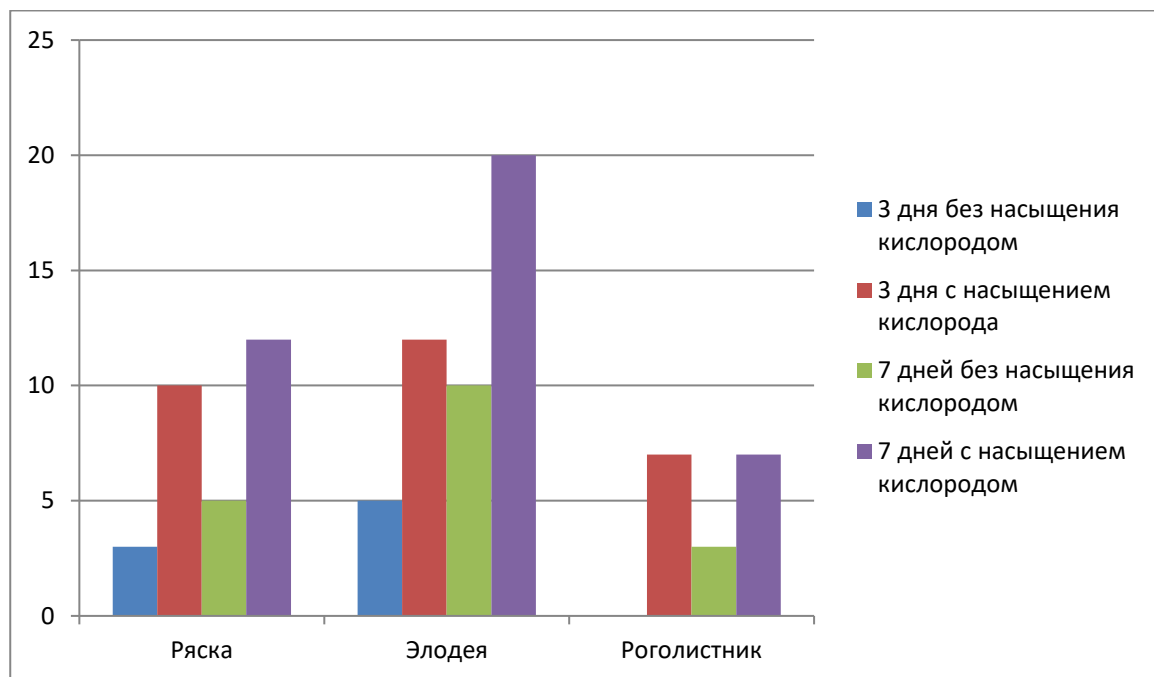
Наиболее эффективным способом очистки воды от ионов меди является присутствие элодеи в загрязненной, которая насыщалась кислородом (чем дольше растение находилось в загрязненной воде, тем меньше стала концентрация ионов меди в предложенном растворе). При длительном стоянии раствора, с погруженным в него растением, без подачи кислорода раствор начинал мутнеть, вследствие процессов жизнедеятельности растений.

Степень очистки определяли по формуле, %:

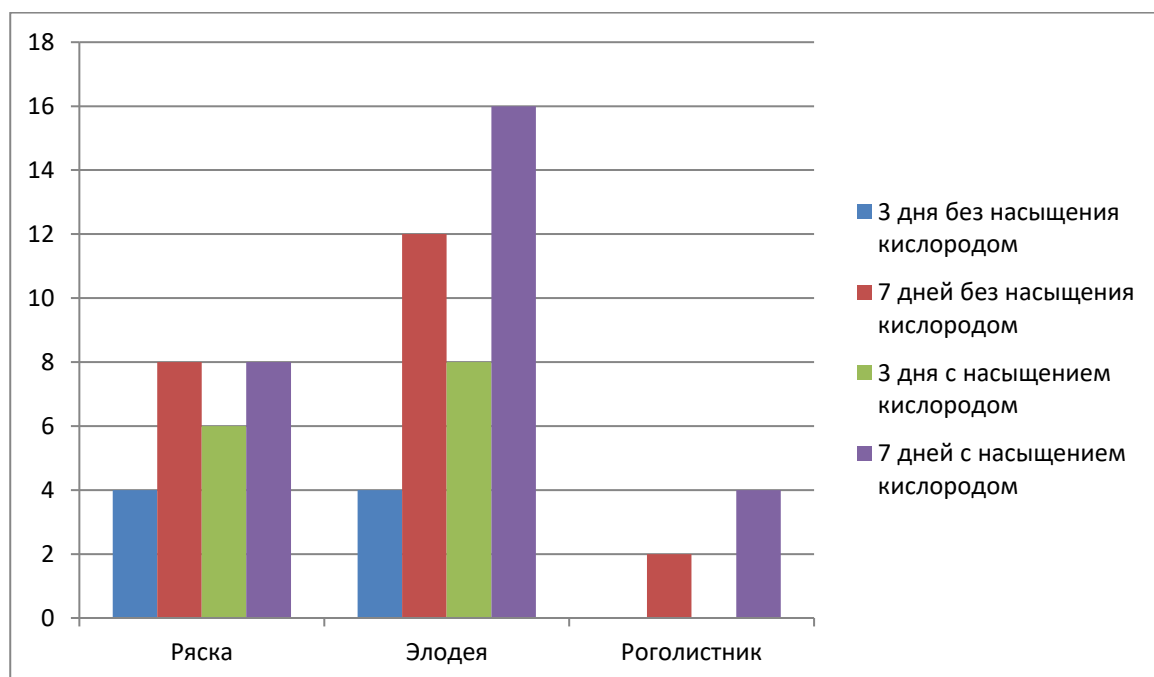
$$Y = \left(\frac{C_0 - C_k}{C_0} \right) \times 100,$$

где C_0 , C_k – начальная и конечная концентрации удаляемого иона металла, мг/л.

Степень очистки исследуемой воды с содержанием ионов меди 0,3 мг/л



Степень очистки исследуемой воды с содержанием ионов меди 0,5 мг/л:



Исходя из полученных результатов, можно сделать выводы о том, что наибольшая степень очистки воды наблюдается в пробе воды, в которой в течение 7 дней находилась элодея при насыщении кислородом (степень очистки увеличивалась в 2 раза). А наименьшие показатели отмечены у роголистника в пробах с начальной концентрацией ионов меди 0,3 и 0,5 мг/л в отсутствии тока кислорода после трех и семи суток пребывания макрофита в загрязненной воде (степень очистки увеличилась в 0,5 раз).

По результатам проделанной работы можно судить о том, что начальная концентрация ионов тяжелых металлов, в частности меди, оказывает незначительное влияние на активность очистки воды макрофитами, а, следовательно, и на степень очистки воды. В среднем степень очистки воды при начальной концентрации ионов меди 0,3 мг/л превышает результаты степени очистки воды при начальной концентрации ионов меди 0,5 мг/л в 1,25 раз, что является не столь существенным показателем. Также было отмечено, что степень очистки воды от ионов меди зависит от времени пребывания макрофитов в загрязнённой воде и от поступления кислорода. Стоит отметить, что наличие тока кислорода благоприятно влияет на очистку воды от ионов меди (II) и препятствует затуханию воды, происходящему вследствие процессов жизнедеятельности водных растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На современном этапе развития человечества большое значение имеют вопросы по очистке воды с использованием экологических способов. Высокие концентрации металлов, таких как медь, в воде приводят к серьезным нарушениям гидробиологического режима водных объектов. В результате вода характеризуется повышенной минерализацией, кислотностью и превышением фоновых концентраций по металлам на несколько порядков. Именно поэтому данная тема является актуальной.

В рамках исследования были изучены водные высшие растения – макрофиты и их способность очищать воду от ионов тяжелых металлов.

По материалам работы можно сделать ряд выводов:

1. Загрязнение окружающей среды медью происходит в результате деятельности человека и природных источников. Также избыток меди в воде оказывает неблагоприятное воздействие на водную флору и фауну, нанося ущерб пресноводным организмам.

2. Роголистник, элодея и ряска являются распространёнными повсеместно. Обладая высокой продуктивностью, они играют важную роль в самоочищении воды. Следовательно, их изучение с целью поиска путей практического применения этих растений для очистки сточных вод от тяжелых металлов.

3. По результатам проведённого исследования было установлено, что наиболее эффективной является очистка воды от содержания ионов меди со степенью окисления +2 в присутствии в загрязненной воде элодеи в течение 7 суток при насыщении воды кислородом (степень очистки увеличилась на 25%).

Список использованной литературы

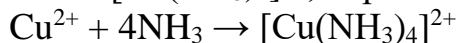
1. Аккумуляция железа, марганца, цинка, меди и хрома у некоторых водных растений / Кадукин А.И., Красинцева В.В., Романова Г.И., Тарасенко Л.В. // Гидробиол. Журнал. - 1982. - Т. 18, №1. - С.79-82.
2. Анищенко Л.Н. Накопительная и фиторемедиационная возможность водных растений по отношению к ионам меди / Л.Н. Анищенко, С.П. Белов, Е.А. Петракова // Вода: химия и экология. 2014. № 6. - С. 60-67.
3. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования от 30 апреля 2003 года № 78 (с изменениями на 30 августа 2016 года). - Типография Нефтяник, 2003.
4. Зотина, Т.А. Оценка токсичности тяжелых металлов для водного растения *Elodea canadensis* / Т.А. Зотина, Н.А. Гаевский, Е.А. Радионова // Journal of Siberian Federal University. Biology 2, 2009. - С. 226-236.
5. Кадукин, А.И. Аккумуляция Fe, Mn, Zn, Си и Cr у некоторых водных растений / А.И. Кадукин, В.В. Красинцева, Г.И. Романова // Гидробиолог. журн. 1982. Т.18. №1. - С.79-82.
6. Никифорова, Л. О. Влияние тяжёлых металлов на процессы биохимического окисления органических веществ: теория и практика / Л. О. Никифорова, Л. М. Белопольский. - М.: БИНОМ., 2007. - 78 с.
7. Остроумов С.А., Шестакова Т.В. Снижение измеряемых концентраций Си, 7п, Cd, РЬ в воде экспериментальных систем с *Ceratophyllum demersum*^. потенциал фиторемедиации / С.А. Остроумов, Т.В. Шестакова // ДАН. Т.428. № 2. 2009. - С. 282-285.
8. Петракова, Е.А. Выбор биологических поглотителей тяжелых металлов в модельных водных растворах // Е.А. Петракова, Л.Н. Анищенко // Актуальные пробл. регион. экологии и биодиагностики живых систем: Матер. XIII Всерос. научно-практической конф. с междунар. участием. Книга 2. (г. Киров, 1-2 декабря 2015 г.). - Киров: Изд-во ООО «Веси». - 2015. - С. 99-102.
9. Розенцвет, О.А. Изучение особенностей аккумуляции ионов тяжелых металлов водными растениями и роли липидов в адаптации к тяжелыми металлам / О.А. Розенцвет // Изв. Самар. НЦ РАН. 2006. - Т.8. - № 3. - С. 7885.
10. Свидерский А.К. Эколого-биогеохимическая оценка аккумуляции тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb, Cr) макрофитами реки Иртыш: Дисс. ..канд.биол.наук. - Семипалатинск, 2002. - 130 с.
11. Титов, А.Ф. Устойчивость растений к тяжёлым металлам / отв. ред. Н.Н. Немова. Институт биологии КарНЦ РАН / А.Ф. Титов, В.В. Таланова, Н.М. Каз-нина, Г.Ф. Лайдинен. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН., 2007. - 172 с.

12. Шашуловская Е.А. О накоплении тяжелых металлов в высшей водной растительности Волгоградского водохранилища/ Е.А. Шашуловская // Поволжский Экологический Журнал, 2009.- № 4. - С. 357 - 360.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Построение калибровочного графика и методика количественного определения меди

Аммиачный метод основан на образовании ионом Cu^{2+} с аммиаком комплекса $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, окрашенного в интенсивно-синий цвет.



Окраска его достаточно устойчива, колориметрировать раствор можно с помощью фотоэлектрического колориметра.

Перед определением концентрации меди в растворе необходимо построить градуировочный график, пользуясь специальным растворителем и стандартным раствором соли меди.

Приготовление раствора сравнения для построения градуировочного графика: 10 мл разбавленного (1:3) аммиака переносят в мерную колбу вместимостью 50 мл, добавляют одну каплю концентрированной серной кислоты (пл. $1,84 \text{ г/см}^3$) и доводят дистиллированной водой до метки (нулевой раствор).

Приготовление стандартного раствора соли меди: 3,927 г химически чистого сульфата меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ переносят в мерную колбу вместимостью 1000 мл, растворяют, приливают 5 мл концентрированной серной кислоты (пл. $1,84 \text{ г/см}^3$) и доводят водой до метки.

Рисунок 1. Приготовленные раствор для сравнения и стандартный раствор



Построение градуировочного графика. В шесть мерных колб вместимостью по 25 мл отмерьте пипетками соответственно 5,0; 4,0; 2,5; 2,0; 1,5; и 1,0 мл стандартного раствора соли меди. В каждую из колб прибавьте по 5 мл разбавленного (1:3) раствора аммиака и доведите объемы дистиллированной водой до метки.

Измерение оптической плотности D начните с раствора, имеющего наибольшую концентрацию меди. Для этого раствор из колбы налейте в кювету с рабочей шириной 10 мм, и измерьте адсорбционность раствора при красном светофильтре.

Измерив D всех растворов и вычислив концентрации растворов меди в колбочках по формуле:

$$C_i = 1 \cdot V_i \text{ (мг)},$$

где V_i – количество стандартного раствора меди, взятое для разбавления, мл.

Рисунок 2. Построение калибровочного графика

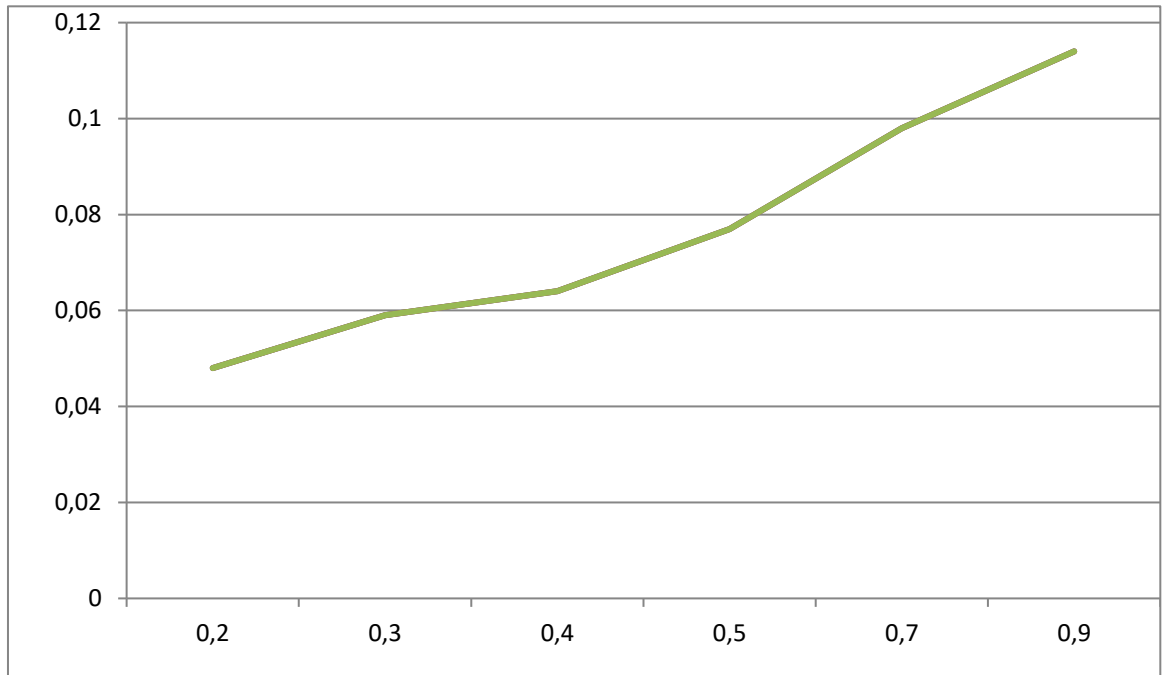


Ход определения меди в исследуемой воде: в мерную колбу вместимостью 25 мл возьмите для анализа немного испытуемого раствора, который может содержать от 0,01 до 0,5 мг Cu^{2+} . Прибавьте в колбу 1 каплю концентрированной серной кислоты (пл. 1,84 г/см³), нейтрализуйте разбавленным (1:3) аммиаком, приливая его по каплям до появления мути. Прилейте еще 5 мл аммиака и доведите объем в колбе водой до метки.

Раствор тщательно перемешайте, наполните им кювету с рабочей шириной 10 мм и измерьте абсорбционность его на правом барабане при длине волны 546, т.е. при тех же условиях, при которых был получен градуировочный график.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Калибровочный график зависимости оптической плотности раствора медного купороса от концентрации в нём ионов меди



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 1. Оптическая плотность исследуемой воды с содержанием ионов меди 0,3 мг/л

Макрофит	Присутствие / отсутствие насыщением кислородом	Время, сутки	Концентрация ионов меди в аквариуме, мг/л	Оптическая плотность
Ряска	Без насыщения кислородом	3	0,29	0,057
		7	0,285	0,056
	С насыщением кислорода	3	0,27	0,053
		7	0,265	0,052
Элодея	Без насыщения кислородом	3	0,285	0,056
		7	0,27	0,053
	С насыщением кислорода	3	0,265	0,052
		7	0,24	0,049
Роголистник	Без насыщения кислородом	3	0,3	0,059
		7	0,29	0,057
	С насыщением кислорода	3	0,28	0,055
		7	0,28	0,055

Таблица 2. Оптическая плотность исследуемой воды с содержанием ионов меди 0,5 мг/л

Макрофит	Присутствие / отсутствие насыщением кислородом	Время, сутки	Концентрация ионов меди в аквариуме, мг/л	Оптическая плотность
Ряска	Без насыщения кислородом	3	0,48	0,074
		7	0,47	0,072
	С насыщением кислорода	3	0,46	0,071
		7	0,46	0,071
Элодея	Без насыщения кислородом	3	0,48	0,074
		7	0,46	0,071
	С насыщением кислорода	3	0,44	0,068
		7	0,42	0,064
Роголистник	Без насыщения кислородом	3	0,5	0,077
		7	0,5	0,077
	С насыщением кислорода	3	0,49	0,075
		7	0,48	0,074

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Процесс очищения воды от ионов меди при помощи макрофитов
Рисунки 3-5. Очистка воды от ионов меди с использованием макрофитов, осуществляемая при постоянном токе кислорода (начальное содержание меди 0, 3 и 0,5 мг/л)



Рисунки 3-5. Очистка воды от ионов меди с использованием макрофитов, осуществляемая без постоянного тока кислорода (начальное содержание меди 0, 3 и 0,5 мг/л)

