

*На правах рукописи*



**РУССКИХ Марина Леонидовна**

**ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ВОД, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ  
МЕТАЛЛАМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ  
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**Специальность 03.02.08 – экология (в химии и нефтехимии)**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Пенза – 2012**

Работа выполнена в Энгельсском технологическом институте (филиал) ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.” на кафедре “Экология и охрана окружающей среды”

**Научный руководитель:** доктор химических наук, профессор  
**Ольшанская Любовь Николаевна.**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Безопасность полетов и жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет гражданской авиации»  
**Николайкин Николай Иванович;**

доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Охрана окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
**Рудакова Лариса Васильевна.**

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», г. Белгород

Защита состоится 21 марта 2012 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.337.02 при ФГБОУ ВПО “Пензенская государственная технологическая академия” по адресу: г. Пенза, пр. Байдукова, ул. Гагарина, д. 1а/11, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО “Пензенская государственная технологическая академия”

Автореферат разослан “16” февраля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Яхкинд Михаил Ильич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время растущее поступление сточных вод (СВ) в природные водоемы приобретает характер глобальной экологической угрозы и все сильнее привлекает внимание ученых и исследователей всего мира. Стоки предприятий химического и нефтехимического профилей содержат различные токсиканты, среди которых особую опасность представляют тяжелые металлы (ТМ). Наносящие серьезный экологический ущерб, тяжелые металлы обладают биологической активностью, мутагенными и канцерогенными свойствами, приводящими к отравлению и гибели организмов. Для минимизации отрицательного влияния ТМ на гидросферу необходима разработка новых и усовершенствование существующих методов очистки стоков путем снижения концентраций токсикантов до нормативов вод рыбохозяйственного назначения.

Наиболее эффективными, рациональными и экологичными могут стать способы очистки, основанные на сочетании применения энергии электромагнитных излучений и способности водной растительности аккумулировать токсиканты. Известно, что при воздействии электромагнитным излучением диапазона крайне высоких частот (ЭМИ КВЧ) на растительные клетки достигается увеличение ионного тока через катионрегулирующие мембранные системы ( $H^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Na^+$ ). Это обусловлено резонансным действием ЭМИ на слабые водородные связи дипольных молекул воды, усилением конвекции растворов и, как следствие, ускорением транспорта протонов. Данная способность ЭМИ КВЧ диапазона может быть основой для разработки новых высокоэффективных технологий очистки сточных вод, направленных на минимизацию антропогенного воздействия на гидросферу, что является важной природоохранной задачей. Поэтому **актуальным** и имеющим научное и практическое значение является изучение ускорения процессов фиторемедиации ионов тяжелых металлов из сточных вод с помощью энергии электромагнитного поля крайне высокой частоты.

**Цель диссертационной работы** – исследование воздействия электромагнитного излучения диапазона крайне высокой частоты (КВЧ) на процессы извлечения ионов тяжелых металлов природным биосорбентом ряски малая (*Lemna minor*), для минимизации негативного воздействия на гидросферу предприятий химической и нефтехимической отраслей промышленности.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Провести мониторинг сточных вод предприятий Саратовской области с целью выявления основных загрязнителей в поверхностных водах.
2. Исследовать воздействие ЭМИ КВЧ диапазона на динамику роста и развития природного гидробионта – ряски малой (*Lemna minor*).
3. Исследовать влияние внутренних (концентрации и природы катионов металлов и анионов, совместное влияние ионов тяжелых металлов (ИТМ) в составе СВ) и внешних (длительность воздействия ЭМИ КВЧ) факторов на эффективность очистки сточных вод от ИТМ фитосорбентом.
4. Определить изменение величины адсорбционной емкости гидробионта ряски малой в зависимости от воздействия внешних и внутренних факторов на процессы извлечения ИТМ.

5. Разработать технологические рекомендации и дать эколого-экономическое обоснование процесса очистки сточных вод методом фиторемедиации с применением энергии электромагнитного излучения диапазона КВЧ.

**Научная новизна работы:**

• Впервые проведены систематические исследования по изучению влияния электромагнитного излучения КВЧ диапазона на процессы фиторемедиации ионов тяжелых металлов из загрязненных вод с помощью биосорбента ряски.

Показано, что облучение природного биосорбента ЭМИ КВЧ диапазона стимулирует рост и развитие растения и увеличивает эффективность удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод.

Определены основные параметры – оптимальное время (15 мин) облучения природного биосорбента, адсорбционная емкость ряски по отношению к ИТМ, эффективность очистки сточных вод.

Установлено, что скорость и полнота поглощения уменьшаются в ряду ионов:  $Cd^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+} > Fe^{2+} > Ni^{2+}$ ;  $SO_4^{2-} > Cl^- > CH_3COO^-$  и определяются химической природой и размером ионов.

**Практическая значимость результатов работы:**

Установлены оптимальные условия облучения природного биосорбента – ряска малая (*L. minor*) ЭМИ КВЧ диапазона с целью достижения максимальной эффективности очистки загрязненных стоков от ионов тяжелых металлов.

Разработаны технологические рекомендации, обеспечивающие при выбранных условиях эффективную очистку сточных вод от катионов тяжелых металлов методом фиторемедиации.

Доказана перспективность очистки сточных вод от ИТМ методом фиторемедиации с применением энергии электромагнитного излучения крайне высокой частоты для минимизации антропогенного загрязнения гидросферы.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Результаты мониторинга сточных вод предприятий химической и нефтехимической отраслей промышленности Саратовской области.

2. Результаты исследования влияния ЭМИ КВЧ диапазона на рост и размножение природного биосорбента ряска малая (*L. minor*).

3. Результаты исследования влияния ЭМИ КВЧ диапазона на процессы фиторемедиации растворов, содержащих индивидуальные ( $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ) и смешанные катионы ( $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ) тяжелых металлов в сточных водах.

4. Установленное влияние ЭМИ КВЧ диапазона и природы анионов ( $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $CH_3COO^-$ ) в составе растворов на процессы удаления металлов из загрязненных вод ряской.

5. Результаты по определению величин адсорбционной емкости гидробионта ряски малой в зависимости от воздействия внешних и внутренних факторов на процессы извлечения ИТМ растениями.

6. Технологические рекомендации и эколого-экономическое обоснование процесса очистки стоков от ИТМ методом фиторемедиации с использованием энергии электромагнитного излучения крайне высокой частоты.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Работа проводилась в соответствии с основными научными направлениями СГТУ по заданию Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы” (2009–2011); планами НИР СГТУ по направлениям: 08.В “Разработка новых высокоэффективных материалов, технологий и оборудования для пищевой, химической, машиностроительной и легкой промышленности”, и 14 В. 03 “Разработка энергосберегающих технологий, способов контроля, очистки и обеззараживания воды, почвы, переработки и утилизации техногенных образований и отходов в товары народного потребления”.

Исследование выполнено в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (Госконтракт № 14.740.12.0865 по обобщенной теме “Исследование новых конструкционных и функциональных материалов и технологий их обработки”) на оборудовании Центра коллективного пользования “Диагностика структуры и свойств наноматериалов” Белгородского государственного национального исследовательского университета (г. Белгород).

Разработанные научные положения диссертации внедрены на предприятиях области: МУП “Энгельс-Водоканал” при работе канализационных очистных сооружений, в ФГБУ “Саратовский район водных путей и судоходства”, и в учебный процесс ЭТИ (филиал) СГТУ им. Гагарина Ю.А. по дисциплинам “Химия окружающей среды”, “Техника защиты окружающей среды”, “Основы водоподготовки и водоочистки”, при курсовом и дипломном проектировании.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертационной работы опубликованы: монография, 23 статьи, включая 3 статьи в журналах по списку ВАК. Результаты работы докладывались и обсуждались на 13 международных, 5 всероссийских и региональных научных конгрессах, конференциях и совещаниях: “Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики” (Тольятти, 2008, 2010), “Захист навколишнього середовища. Енергощадність” (Украина, Львов, 2009), “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення” (Украина, Алушта, 2009), “Инновации и актуальные проблемы техники и технологий” (Саратов, 2009), “Эколого-правовые и экономические аспекты техногенной безопасности регионов” (Украина, Харьков, 2009, 2011), “Проблемы обеспечения экономической безопасности” (Энгельс, 2009), “Композит–2010” (Саратов), “Инновации и актуальные проблемы техники и технологий” (Саратов, 2010), “Экология: синтез естественнонаучного, технического и гуманитарного знания” (Саратов, 2010), “Экологические проблемы промышленных городов” (Саратов, 2011), “Техногенная и природная безопасность” (Саратов, 2011), “Экология – образование, наука, промышленность и здоровье” (Белгород, 2011).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 166 страницах, содержит 28 таблиц, 58 рисунков и 243 литературных источника.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во *введении* обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, отражены научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем работы.

### **Глава 1. Литературный обзор**

В главе рассмотрены основные проблемы загрязнения гидросферы ионами тяжелых металлов; проанализированы методы очистки сточных вод от ТМ; систематизированы и обобщены результаты исследований, связанных с особенностями использования высших водных и наземных растений для очистки промышленных стоков от ИТМ методами фиторемедиации. Приведены основные сведения о строении растительной клетки, рассмотрены механизмы проникновения (транспорта) ионов тяжелых металлов в растительную клетку. Проанализированы и систематизированы данные по механизмам влияния различных электромагнитных полей (ЭМИ: постоянное магнитное и геомагнитное поля, ультрафиолетовое, инфракрасное, лазерное излучения), в том числе ЭМИ диапазона крайне высокой частоты на воду и живые организмы.

### **Глава 2. Экологический мониторинг сточных и поверхностных вод Саратовской области**

Саратовская область является крупным промышленным регионом. Проведенный анализ состояния водных объектов области показал, что качество воды в них находится на низком уровне. Основной причиной загрязнения водоемов продолжает оставаться сброс загрязненных сточных вод. Основной объем сброса СВ приходится на бассейн реки Волги (95,6 %). Максимальный вклад в загрязнение вод вносят сульфаты, хлориды, азотная группа и тяжелые металлы. Значительными выбросами ТМ отличаются предприятия химической, нефтехимической и электротехнической отраслей промышленности. Общее количество тяжелых металлов, сброшенных в водные объекты только в 2010 г., составило ~ 20 тонн.

### **Глава 3. Методика эксперимента**

Глава посвящена описанию объектов и методов исследования.

Объектами исследования являлись: 1) фитосорбент – ряска малая, районированная в Саратовской области, используемая для фиторемедиации катионов тяжелых металлов из сточных вод; 2) модельные сульфатные растворы, содержащие катионы тяжелых металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ) с начальной концентрацией 1 и 5 мг/л; 3) модельные растворы сульфата, хлорида и ацетата меди с начальной концентрацией  $\text{Cu}^{2+}$ , равной 5 мг/л.

В работе изучено влияние электромагнитного излучения диапазона крайне высокой частоты на процессы фиторемедиации ИТМ из сточных вод, для этого растения (ряска малая) одинакового срока вызревания массой 20 г помещались в модельные растворы объемом 1 л, подвергались воздействию ЭМИ КВЧ (65 ГГц) диапазона, и далее в процессе выдержки растений в растворах контролировалось содержание в них остаточного количества металлов и состо-

яние растений. Приведены методики приготовления растворов, для которых использовались реактивы марок “х.ч.” и “ч.д.а.”.

Дано описание используемых в работе физико-химических (фотометрия, оптическая и растровая микроскопия) и электрохимических (инверсионная хроновольтамперометрия) методов исследования. Представлены приборы и установки для облучения биосорбента (генератор Г4-142 (диапазон частот 53–75 ГГц) и высокочастотная установка, источником излучения в которой являлась лампа обратной волны ЛОВ-87 “А”, плотность потока энергии (ППЭ) в месте расположения биообъектов составляла 120 мкВт/см<sup>2</sup>), которые позволили достаточно полно изучить закономерности и механизмы процессов, протекающих при извлечении ИТМ высшими водными растениями. Приведены основные уравнения и методики для расчета эффективности очистки, содержания тяжелых металлов в фитомассе растения-сорбента, величины электрохимической емкости, затраченной растениями на извлечение ИТМ и др. Используемое в работе современное оборудование (роботизированный комплекс “Экспертиза ВА-2D” с электродом “3 в 1”, фотоэлектроколориметр КФК-3-01, спектрофотометр ПЭ 5300В, микроскоп Violog, растровый микроскоп QUANTA 600 FEG 3D) и проводимая на каждом этапе статистическая обработка полученных данных позволили уменьшить общую погрешность результатов эксперимента до 5–8 % от измеряемой величины.

#### **Глава 4. Влияние ЭМИ на процессы фиторемедиации стоков**

##### **4.1. Влияние ЭМИ КВЧ диапазона на процессы роста и развития природного биосорбента ряски малой (*Lemna minor*)**

В последние десятилетия обнаружены многочисленные факты, свидетельствующие о высокой чувствительности биологических систем к низкоинтенсивному электромагнитному излучению (ЭМИ) крайне высокой частоты (КВЧ). Исследования указывают на увеличение средней продолжительности жизни организмов и их выживаемость при воздействии электромагнитных полей. В работе изучено влияние длительности воздействия электромагнитного поля КВЧ диапазона, частотой 65 ГГц, на динамику численности растений ряски малой (рис. 1). Установлено, что наибольший рост и размножение ряски малой при частоте 65 ГГц происходит при облучении ЭМИ КВЧ диапазона в течение 15, 30 минут, количество листочков увеличивается по сравнению с контролем на 3–12 %. После облучения в течение 5 и 10 мин не достигается “подкачка энергии”, необходимая для стимуляции процесса развития растений. Количество листочков в сравнении с контролем оказалось меньше. Это соответствует литературным данным (Синицын Н.И., 1999 г.) и свидетельствует о максимальном отклике гидробионтов на частоту 65 ГГц при плотности потока энергии 120 мкВт/см<sup>2</sup> и времени облучения 15 мин.

Полученные результаты являются подтверждением известного механизма водоэлектрического эффекта и структуризации тонкого водосодержащего слоя. Первичной мишенью в этом случае при воздействии ЭМИ на биологические системы являются молекулы примембранной воды, что согласуется с данными о воздействии КВЧ-излучения на процессы жизнедеятельности клеток организ-

мов, сопровождающемся изменением кластерной структуры молекул примембранной воды, разности потенциалов на клеточной мембране, ее проницаемости и, как следствие, изменением физиологических параметров клетки.

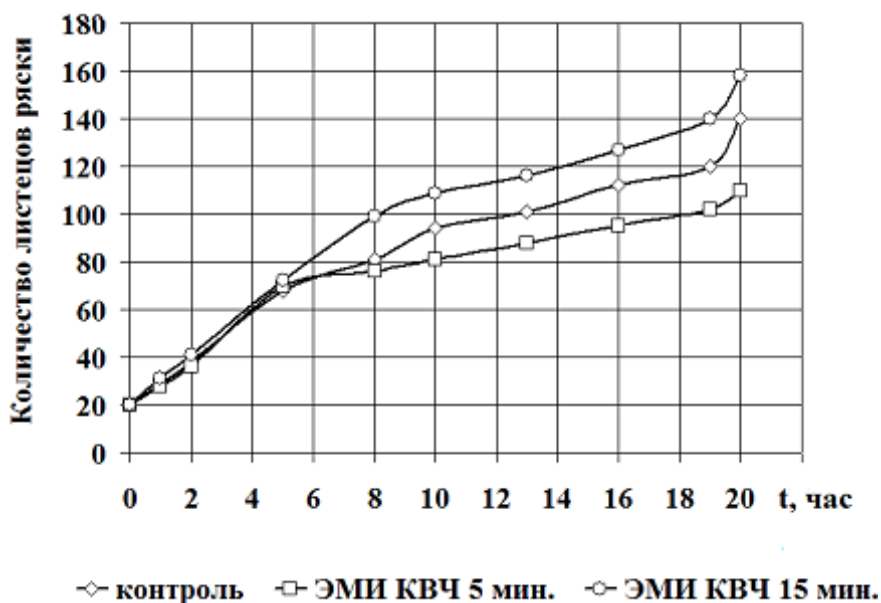


Рис. 1. Динамика размножения ряски малой (*Lemna minor*) без и при воздействии ЭМИ частотой 65 ГГц в течение различного времени

Полученные данные подтверждают вышеизложенные предположения о том, что ЭМИ КВЧ диапазона проявляет свое воздействие как стимулирующий фактор, под действием которого на резонансных частотах происходит разупорядочение структуры сетки водородных связей воды. Это ведет к нарушению кластерной структуры воды, изменению биологической активности клетки (размножение клеток водорослей и фотосинтетической активности) за счет изменения транспортной активности Са-АТФазы и, как следствие, ее энергетического потенциала.

#### 4.2. Влияние ЭМИ КВЧ диапазона

##### на извлечение ионов из загрязненных вод

Способность растительной клетки к аккумуляции **катионов тяжелых металлов** ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{C}_{\text{нач ИТМ}} = 1 \text{ мг/л}$ ) под воздействием ЭМИ КВЧ диапазона исследовалась на частоте 65 ГГц, при облучении растений ряски в течение 5, 10, 15 и 30 мин (рис. 2). Остаточные концентрации ионов тяжелых металлов в модельных растворах определялись вольтамперометрическим и фотометрическим методами. Установлено изменение концентрации ионов отдельных металлов в пробах в зависимости от времени облучения и времени пребывания ряски в модельных растворах сточных вод.

Без предварительного облучения ионы кадмия в течение первого часа извлекались из растворов с наиболее высокой скоростью. Остаточная концентрация ИТМ  $\text{Cd}^{2+}$  оказалась самой низкой среди исследованных катионов – 0,164 мг/л. При облучении ряски ЭМИ частотой 65 ГГц и длительности воздействия 5 и 10 мин наблюдалось резкое уменьшение концентрации остаточных катионов  $\text{Cd}^{2+}$  в раство-



ре уже через 5 часов после облучения, а через сутки кадмий в растворе практически не обнаруживался (эффективность очистки  $\Delta = 98\%$ ). Концентрация токсичных ионов  $\text{Cd}^{2+}$  в фитомассе оказалась ниже, чем в контрольной пробе.

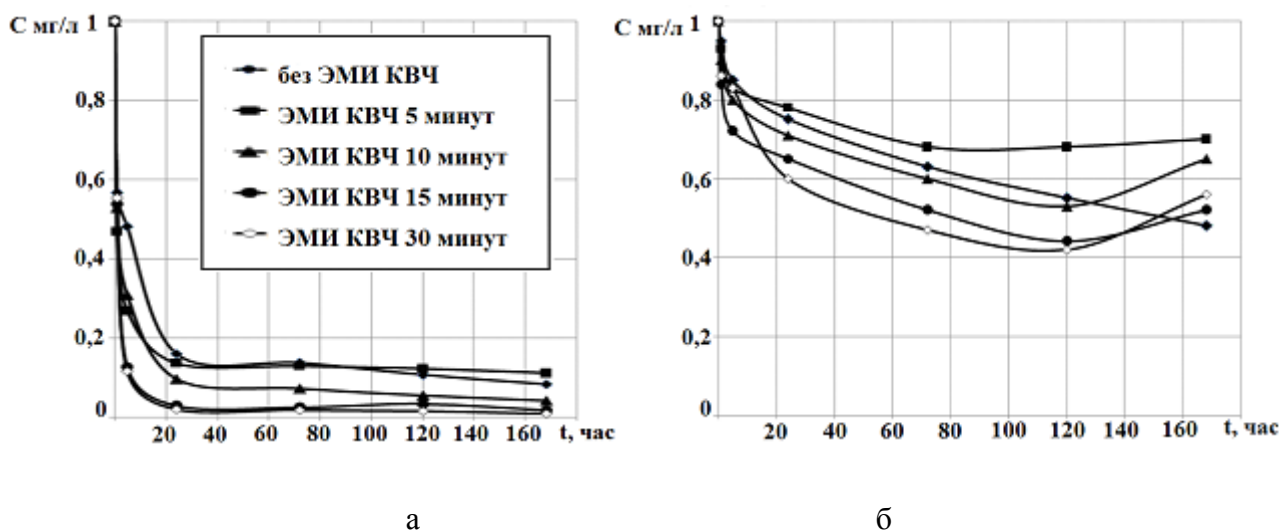


Рис. 2. Изменение концентрации ИТМ  $\text{Zn}^{2+}$  (а) и  $\text{Ni}^{2+}$  (б) в растворе от длительности облучения ЭМИ КВЧ и времени выдержки ряски

Анализ данных по извлечению ионов цинка (рис. 2) из стоков показал, что ЭМИ стимулирует процессы биосорбции в широком временном диапазоне облучения (10, 15, 30 минут). В этих условиях эффективность очистки стоков от ионов  $\text{Zn}^{2+}$  составила 93–97%. Воздействие ЭМИ в течение 5 минут не влияло на ускорение процесса адсорбции в сравнении с контролем.

Ионы меди лучше всего аккумулировались растительной клеткой, не подвергнутой облучению. В пробах, в которых ряска облучалась, наблюдалось уменьшение скорости извлечения ионов. Это свидетельствует о сенсорных свойствах растения – избыточные количества меди, отличающейся высокой реакционной способностью и токсичностью для биообъектов инактивируются и не поглощаются. Эффективность очистки стоков от меди в оптимальных условиях составила 85–90%.

Извлечение ионов никеля растением, как без облучения, так и при облучении в исследованном временном диапазоне происходило с самыми низкими, в сравнении с другими катионами, скоростями. Так после пребывания ряски в растворе сульфата никеля в течение 3 суток после ее облучения в течение 15 и 30 мин остаточная концентрация составила всего 0,52 и 0,47 мг/л, соответственно. На 5 сутки наблюдался обратный выброс ионов в раствор (рис. 2), что свидетельствует о предельном накоплении фитомассы металлом. С наиболее низкими скоростями происходило удаление ионов никеля после предварительной высокочастотной обработки растения в течение 5 минут. По-видимому, ЭМИ стимулирует процесс метаболизма, и этим можно объяснить более быстрый выброс ионов никеля из объема фитомассы обратно в раствор в сравнении с контролем. Эффективность очистки стоков от никеля составила 55–60% (облучение 15 и 30 мин).

Поглощение ряской ионов железа с достаточно высокой эффективностью наблюдалось после облучения биообъекта ЭМИ КВЧ в течение 15 мин. На пятые сутки, как и в случае ионов никеля, достигалось предельное накопление фитомассы металлом и последующий выброс избыточной концентрации в раствор. Эффективность извлечения по ионам  $Fe^{2+}$  составила для исследуемого диапазона облучений 52–70 %.

Таким образом, полученные данные по влиянию природы **катионов** на процессы фиторемедиации позволили установить, что скорость извлечения ИТМ ряской во всем временном диапазоне облучения уменьшается в ряду:  $Cd^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+} > Ni^{2+}$  и зависит от размера катионов металла. В этом же ряду уменьшаются радиусы гидратированных катионов металлов. Катион с большим радиусом ( $Cd^{2+}$ ) имеет более слабую связь к гидратной оболочкой, легче отрывается от нее и сорбируется в растительную клетку. Напротив, катионы меньших размеров ( $Fe^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ) прочнее удерживают гидратную оболочку, и им сложнее проникнуть внутрь клеточной ткани. Эффективность очистки возрастала с длительностью выдержки растения в растворе и в вышеперечисленном ряду ИТМ для лучших условий облучения составила от 98 % ( $Cd^{2+}$ ) до 60 % ( $Ni^{2+}$ ).

Проявление различных эффектов ЭМИ КВЧ, а в отдельных случаях и полное их отсутствие, как указывалось выше, можно объяснить тем, что с увеличением времени воздействия ЭМИ КВЧ увеличивается количество энергии, поглощенное растением. Восприятие электромагнитной энергии осуществляется молекулами свободной и связанной воды, входящей в состав биологических мембран. При этом происходит изменение структуры воды, увеличение проницаемости биологических мембран, что способствует усилению транспорта веществ из окружающей среды в клетку.

Изучено влияние **природы анионов** (А:  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  и  $CH_3COO^-$ ) на процесс извлечения ряской катионов меди ( $C_{нач} = 5$  мг/л) из сточных вод при воздействии ЭМИ КВЧ диапазона и без него (табл. 1, рис. 3). В результате исследования было установлено, что в течение первого часа эффективность очистки и скорость процесса извлечения ионов меди уменьшалась в ряду анионов следующим образом:  $CH_3COO^- > SO_4^{2-} > Cl^-$  (рис. 3). Этот факт может быть объяснен тем, что сила ионного взаимодействия меди с анионом большего размера ( $CH_3COO^-$ ) наименьшая, и катион  $Cu^{2+}$  легче отрывается и поглощается растением. По истечении 5 часов картина меняется: крупные ацетат-ионы после извлечения меди ряской накапливаются в растворе вблизи клетки, экранируют активные центры сорбции, и затормаживают процесс диффузии катионов меди в растительную клетку. В этом случае ионы меди эффективнее всего извлекались из сульфатного раствора, а в растворе ацетата эффективность оказалась самой низкой ( $SO_4^{2-} > Cl^- > CH_3COO^-$ ). Было обнаружено, что в растворе хлорида  $CuCl_2$  уже по истечении часа наблюдалось изменение внешнего вида ряски. В частности, цитоплазмоллиз и некроз листецов ряски протекал быстрее, чем в остальных растворах. Это подтверждает известный факт о губительном действии сильно-

го окислителя – иона хлора на живые организмы. Поэтому, суммация двух эффектов: меньший размер  $Cl^-$  и, как следствие, более сильная энергия связи (диссоциация) с катионом меди, а также сильные окислительные свойства, способствуют снижению эффективности извлечения меди из хлоридных растворов.

Таблица 1. Изменение концентрации ионов меди ( $C_{начCu^{2+}} = 5 \text{ мг/л}$ ) и эффективности очистки растворов  $CuA$  в зависимости от времени пребывания биосорбента в воде

Время t, ч	$Cl^-$		$SO_4^{2-}$		$CH_3COO^-$	
	C, мг/л	Э, %	C, мг/л	Э, %	C, мг/л	Э, %
1	4,33	14,3	4,23	15,4	4,21	15,8
5	3,90	21,0	3,70	26,0	4,18	16,4
24	3,21	36,4	2,81	43,8	4,05	19,0
72	2,85	43,6	2,58	48,4	3,80	24,0
120	2,63	47,4	2,47	50,6	3,51	29,8
168	2,55	49,5	2,39	52,2	3,12	37,6
240	2,51	50,3	2,21	55,8	2,99	40,2

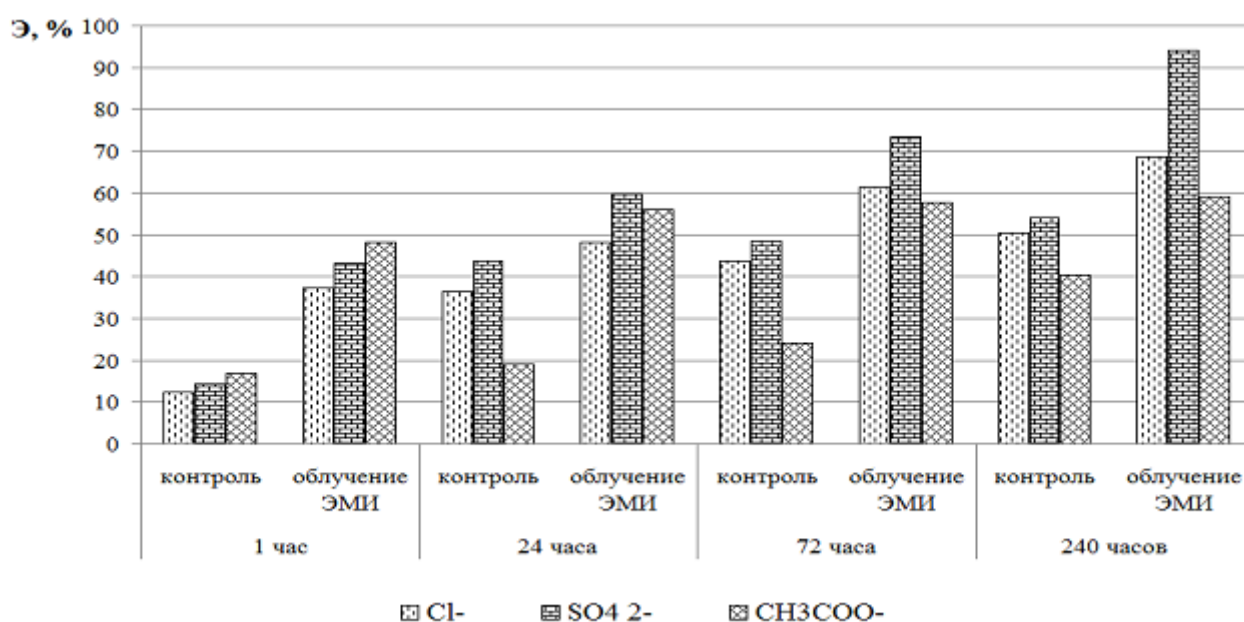


Рис. 3. Эффективность очистки сточных вод от ионов меди ряской в растворах  $CuCl_2$ ,  $CuSO_4$ ,  $(CH_3COO)_2Cu$ , без облучения и после облучения ЭМИ КВЧ в течение 15 минут

Следует отметить, что в случае воздействия ЭМИ КВЧ эффективность извлечения меди увеличивается для всех анионов на 10–30 % в сравнении с процессами без облучения (рис. 3) при увеличении длительности выдержки растений в растворах солей. Длительность облучения незначительно влияла на эффективность процесса фитосорбции ИТМ.

### 4.3. Селективное извлечение тяжелых металлов ряской из смешанных сточных вод

Проведенные исследования по извлечению ионов тяжелых металлов ряской из смешанного раствора сульфатов меди, цинка и кадмия (табл. 2, рис. 4, 5) показали, что результаты отличаются от полученных данных для процессов, протекающих в индивидуальных растворах.

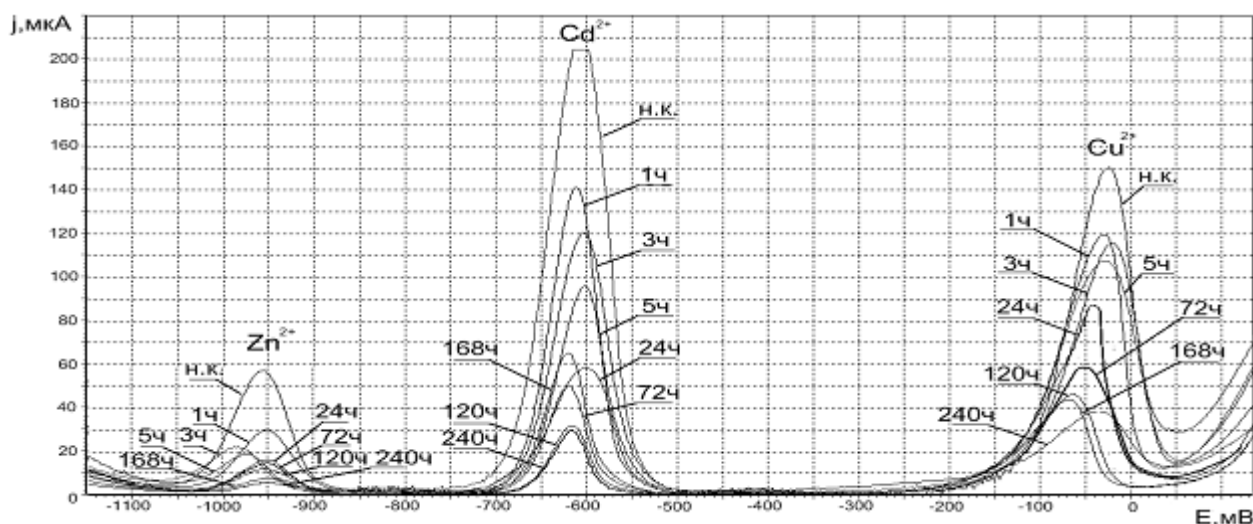


Рис. 4. Вольтамперометрические  $j, E$ -кривые, полученные при извлечении цинка, кадмия и меди на электроде "3 в 1" из смешанного раствора сульфатов металлов

Эффективность удаления металлов из модельных растворов, содержащих только один металл, наблюдалась в ряду:  $\text{Cu}^{2+} < \text{Zn}^{2+} < \text{Cd}^{2+}$ , и зависела от радиуса гидратированного катиона металла (для сульфатных растворов  $r_{\text{Cd}^{2+}} = 0,23$  нм,  $r_{\text{Zn}^{2+}} = 0,21$  нм,  $r_{\text{Cu}^{2+}} = 0,19$  нм). При этом, как указывалось выше, катион большего размера, имея более слабую связь с гидратной оболочкой, активнее сорбировался растением. Эффективность очистки возрастала с увеличением времени выдержки растения в растворе. В случае же облучения ряски, находящейся в растворе смеси этих катионов, с помощью ЭМИ КВЧ диапазона частотой 65 ГГц, наиболее полно, глубоко и эффективнее остальных ИТМ растением извлекались катионы цинка (табл. 2, рис. 5). Уже в течение первого часа их концентрация в растворе уменьшилась на треть (рис. 5), а по истечении 7 суток практически весь цинк был извлечен –  $\Theta = 95,6$  % (рис. 5). При этом уже через сутки концентрация ионов цинка в растворе составила 0,89 мг/л, что оказалось ниже величины ПДК = 1 мг/л по цинку для лимитирующего показателя вредности воды в водоеме. Лучшие результаты получены при облучении в течение 15 минут.

Процесс извлечения катионов кадмия протекал с меньшими скоростями, чем извлечение цинка как при облучении ЭМИ КВЧ (табл. 2), так и без него (рис. 5). Эффективность очистки после первого часа составила без облучения 30 %, по истечении 120 ч эффективность извлечения достигла 84 % (рис. 5). На 7 суток в необлученных образцах наблюдался выброс избыточных катионов

кадмия обратно в раствор. Для этого металла эффективность поглощения оказалась низкой, и не была достигнута величина ПДК, которая для лимитирующего показателя вредности воды в водоеме по кадмию составляет 0,001 мг/дм<sup>3</sup>.

Таблица 2. Изменение концентрации ионов Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> в смеси раствора (мг/л, числитель) и эффективность очистки (% , знаменатель) при облучении ЭМИ КВЧ 65 ГГц в течение 5, 10, 15, 30 мин (C<sub>итм</sub> = 5 мг/л)

Время t, ч	5 мин			10 мин			15 мин			30 мин		
	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
1	<u>3,59</u> 28,2	<u>3,34</u> 33,2	<u>3,95</u> 21,0	<u>3,56</u> 28,8	<u>3,43</u> 31,4	<u>4,00</u> 20,0	<u>3,50</u> 30,0	<u>3,29</u> 34,2	<u>3,88</u> 22,4	<u>3,55</u> 29,0	<u>3,39</u> 32,2	<u>3,90</u> 22,0
3	<u>1,69</u> 66,2	<u>2,70</u> 46,0	<u>3,75</u> 25,0	<u>1,72</u> 65,6	<u>2,76</u> 44,8	<u>3,80</u> 24,0	<u>1,61</u> 67,8	<u>2,63</u> 47,4	<u>3,64</u> 27,2	<u>1,69</u> 66,2	<u>2,68</u> 46,4	<u>3,67</u> 26,6
5	<u>1,43</u> 71,4	<u>1,35</u> 73,0	<u>3,42</u> 31,6	<u>1,46</u> 70,8	<u>1,42</u> 71,6	<u>3,53</u> 29,4	<u>1,37</u> 72,6	<u>1,21</u> 75,8	<u>3,33</u> 33,4	<u>1,40</u> 72,0	<u>1,31</u> 73,8	<u>3,38</u> 32,4
24	<u>1,16</u> 76,8	<u>0,97</u> 80,6	<u>3,10</u> 38,0	<u>1,27</u> 74,6	<u>1,10</u> 78,0	<u>3,27</u> 34,6	<u>1,09</u> 78,2	<u>0,89</u> 82,2	<u>2,80</u> 44,0	<u>1,13</u> 77,4	<u>0,95</u> 81,0	<u>3,00</u> 40,0
72	<u>0,88</u> 82,4	<u>0,33</u> 93,4	<u>2,60</u> 48,0	<u>0,98</u> 80,4	<u>0,47</u> 90,6	<u>2,62</u> 47,6	<u>0,76</u> 84,8	<u>0,30</u> 94,0	<u>2,46</u> 50,8	<u>0,82</u> 83,6	<u>0,39</u> 92,2	<u>2,50</u> 50,0
120	<u>0,74</u> 85,2	<u>0,28</u> 94,4	<u>1,53</u> 69,4	<u>0,82</u> 83,6	<u>0,29</u> 94,2	<u>1,59</u> 68,2	<u>0,64</u> 87,2	<u>0,26</u> 94,8	<u>1,50</u> 70,0	<u>0,68</u> 86,4	<u>0,27</u> 94,6	<u>1,45</u> 71,0
168	<u>0,69</u> 86,2	<u>0,21</u> 95,8	<u>1,29</u> 74,2	<u>0,76</u> 84,8	<u>0,25</u> 95,0	<u>1,25</u> 75,0	<u>0,60</u> 88,0	<u>0,17</u> 96,6	<u>1,10</u> 78,0	<u>0,64</u> 87,2	<u>0,20</u> 96,0	<u>1,16</u> 76,8
240	<u>0,53</u> 89,4	<u>0,12</u> 97,6	<u>1,05</u> 79,0	<u>0,61</u> 87,8	<u>0,16</u> 96,8	<u>1,00</u> 80,0	<u>0,42</u> 91,6	<u>0,11</u> 97,8	<u>0,87</u> 82,6	<u>0,49</u> 90,2	<u>0,13</u> 97,4	<u>0,95</u> 81,0

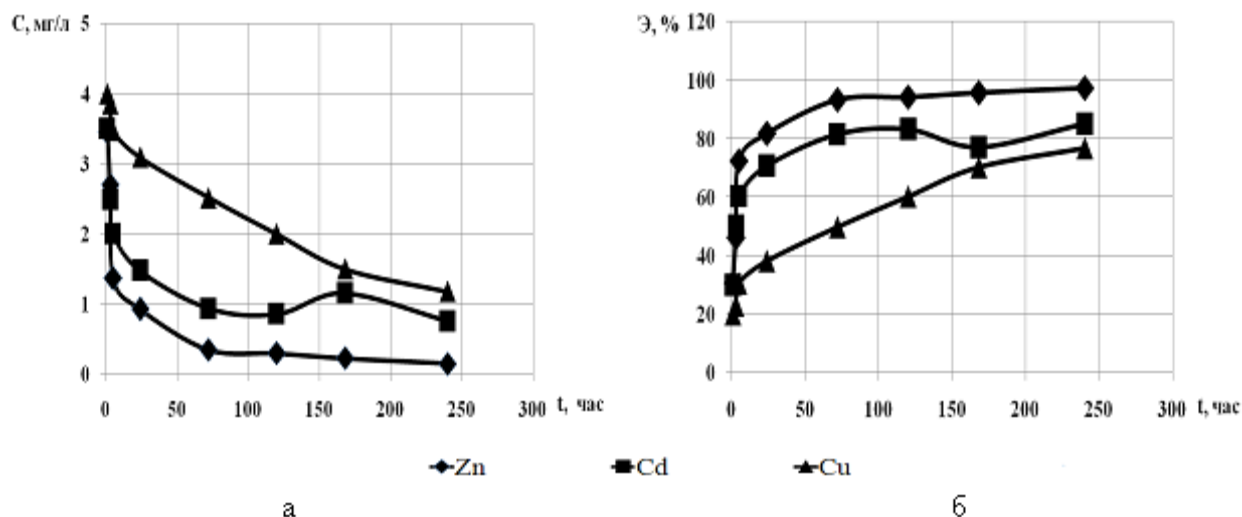


Рис. 5. Изменение концентрации (а) и эффективности (б) извлечения металлов ряской из смешанного раствора сульфатов металлов (C<sub>начитм</sub> = 5 мг/л) без воздействия ЭМИ

С меньшей скоростью из смешанного раствора извлекались катионы меди. Вместе с тем следует отметить, что при воздействии электромагнитного излучения удаление Cu<sup>2+</sup> происходило интенсивнее, чем без него. Уже через 10 дней была достигнута величина лимитирующего признака вредности по меди в водоемах ПДК = 1 мг/дм<sup>3</sup> в 3 вариантах облучения (10, 15 и 30 мин).

Таким образом, скорость извлечения металлов ряской из смешанного раствора уменьшалась в ряду  $Zn > Cd > Cu$ , который отличается от вышеприведенного ряда для однокомпонентных растворов и определяется величиной лимитирующего показателя вредности воды в водоеме.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что электромагнитное поле стимулирует избирательное (селективное) поглощение катионов металлов природным биосорбентом – ряской малой. С наиболее высокой скоростью извлекается цинк, который в вышеперечисленном ряду является наименее токсичным металлом. Установлено, что присутствие в стоках цинка оказывает мешающее влияние на извлечение ряской катионов кадмия, а присутствующие в сточной или поверхностной воде  $Zn$  и  $Cd$  оказывают мешающее влияние на извлечение ряской катионов  $Cu$ , скорость, полнота извлечения которой оказались наиболее низкими. Ряской в первую очередь и в наибольшем количестве поглощается менее токсичный  $Zn$ , за ним следует  $Cd$ , который, как известно, не принимает участия в биохимических процессах в клетках растения, а транспортируется, как правило, в межклеточное пространство или в вакуоли. Установлено, что с наименьшими скоростями извлекаются катионы меди, которая, в отличие от кадмия, является биогенным элементом, принимающим участие в строителстве и метаболизме клеточной ткани растений. Полученные экспериментальные результаты согласуются с литературными данными.

#### 4.4. Микроструктурные исследования

Микроструктурный анализ листецов ряски, в процессе извлечения металлов проводили с помощью микроскопа *Viola* и цифрового фотоаппарата. Листецы предварительно окрашивали сафранином, который легко проникает в мертвые ткани растения. По окрашенной площади судили о процессах цитоплазмоллиза или некроза растений. С увеличением длительности эксперимента, в растворе  $CuSO_4$  ( $C_{итм} = 5$  мг/л) без воздействий ЭМИ КВЧ наблюдалось постепенное увеличение площади листеца, окрашенного сафранином. На 5-й день окрашенной оказалась ~ 50 % площади. При изучении влияния ЭМИ КВЧ было установлено, что 50 % площади окрашенных сафранином листецов достигалось значительно раньше, уже через 4–5 часов, а спустя 5 суток количество окрашенных листецов достигло 70 %, что подтверждает увеличение скорости поглощения катионов металлов растением при воздействии ЭМИ КВЧ.

Проведенные на растровом электронном микроскопе *QUANTA 600 FEG 3D* исследования по влиянию природы металла (рис. 6) позволили установить изменения в структуре растительной ткани.

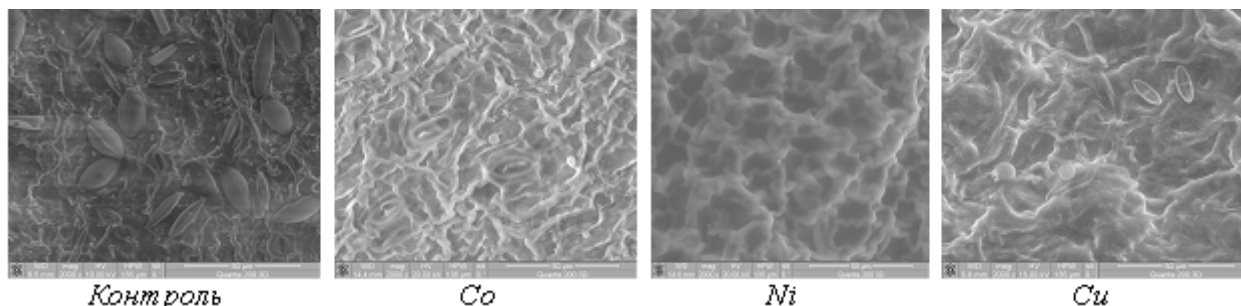


Рис. 6. Микроструктурные исследования листецов ряски в растворах  $MeSO_4$

## Глава 5. Технологические рекомендации по фиторемедиации сточных вод с применением ЭМИ КВЧ

Проблемой биосорбционной очистки является утилизация сорбентов, которые не подлежат регенерации. Природный биосорбент при условии, что он не содержит избыточного накопления опасных количеств вредных веществ, после сбора может быть использован для изготовления бумаги, биоудобрений или направлен на переработку на газ и жидкое топливо.

На основании полученных данных нами разработаны **технологические рекомендации** и предложена **схема очистки** загрязненных стоков от меди с помощью ряски при воздействии ЭМИ КВЧ (рис. 7).

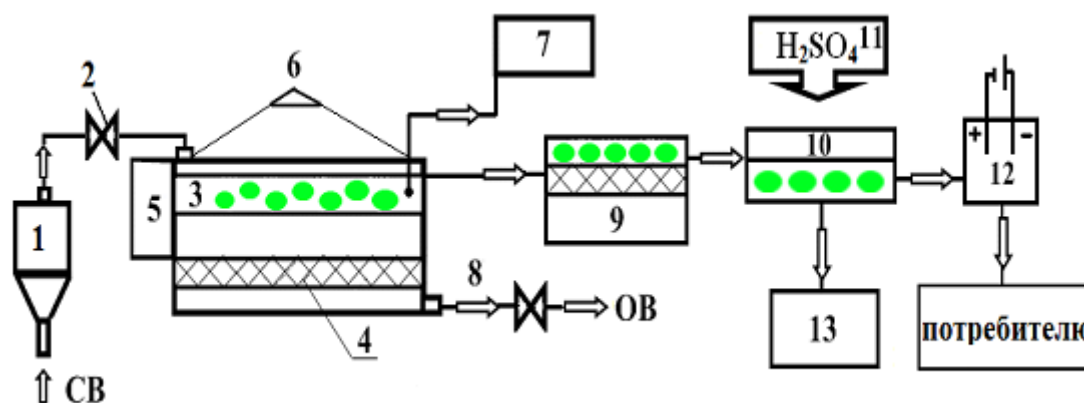


Рис. 7. Технологическая схема фиторемедиации металлов из сточных вод с использованием ЭМИ КВЧ

Процесс с использованием энергии электромагнитного излучения, при котором достигается высокая эффективность очистки включает следующие стадии: **1** – сбор загрязненной воды в усреднителе; перекачка СВ с помощью насоса **2** в искусственный биопруд **3**, заселенный ряской, и оборудованный нижним сетчатым поддоном **4**; облучение растений генератором ЭМИ **5** с рупором **6**; **7** – контроль остаточного содержания меди в растворе; **8** – сброс очищенной воды; **9** – подъем отработанной фитомассы поддоном; **10** – приготовление раствора элюата с помощью кислоты из резервуара **11**; электрохимическое извлечение меди из элюата в ванне **12**; **13** – утилизация обезвреженной фитомассы (изготовление бумаги, переработка на газ, топливо и др.).

Анализ полученных данных по величинам адсорбционной емкости ряски ( $A_r$ ) и эффективности очистки СВ от ИТМ позволил установить, что при воздействии ЭМИ КВЧ и определенной длительности выдержки ряски в растворе количество извлеченного фитомассой металла возрастает. Наибольшие значения, составившие ( $A_r$ , г/кг): по цинку – 0.247, по кадмию – 0.229 и по меди – 0.209 (что на 8–14 % больше, чем в контроле), получены после облучения растения в течение 15 минут.

Проведенное эколого-экономическое обоснование и расчет предотвращенного экологического ущерба водным ресурсам, показал, что при внедрении метода фиторемедиации с использованием воздействия ЭМИ КВЧ диапазона, мож-

но в более короткие сроки снизить загрязнение водных ресурсов тяжелыми металлами. Например, извлечение только одного металла – меди, из смешанного раствора позволит получить экономический эффект в сумме ~ 22 тыс. руб. за 1 м<sup>3</sup> очищенной воды. Кроме этого только за счет экономии электроэнергии можно получить прибыль около 590 тыс. руб./год.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен мониторинг сточных вод предприятий Саратовской области и выявлено, что основными загрязнителями в поверхностных водах являются сульфаты, хлориды, азотная группа и тяжелые металлы. Ежегодное поступление в водные объекты ГМ, отличающихся мутагенными и канцерогенными свойствами и приводящих к отравлению и гибели организмов, в течение последних пяти лет оценивается в ~ 20 тонн.

2. Установлено, что облучение природного биосорбента ряски малой (*Lemna minor*) ЭМИ КВЧ диапазона в течение 15 и 30 минут стимулирует рост и развитие растения.

3. Установлено, что под воздействием ЭМИ КВЧ диапазона эффективность извлечения ионов из индивидуальных растворов снижается в ряду:  $Cd^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+} > Fe^{2+} > Ni^{2+}$  и зависит от размера катионов и физико-химических свойств металла. Эффективность очистки возрастала с длительностью выдержки растения в растворе, и в вышеперечисленном ряду ИТМ для лучших условий облучения составила от 98 % ( $Cd^{2+}$ ) до 60 % ( $Ni^{2+}$ ).

Для смешанных растворов скорость и эффективность извлечения металлов ряской уменьшается в ряду  $Zn > Cd > Cu$  ( $\Theta = 98, 86$  и  $79$  %, соответственно), и определяется сенсорными способностями растения и величиной лимитирующего показателя вредности воды в водоеме. Лучшие результаты получены после облучения в течение 15 минут.

4. Установлено, что без и при действии ЭМИ КВЧ эффективность поглощения меди ряской уменьшается в ряду анионов:  $SO_4^{2-} > Cl^- > (CH_3COO)_2$ . Ряска, подвергнутая облучению извлекает меди на 15–30 % больше, в сравнении с контролем. Длительность процесса облучения незначительно влияет на процесс фитосорбции.

5. Выбраны оптимальные режимы и условия (длительность воздействия ЭМИ КВЧ 15 и 30 мин, и продолжительность выдержки растения 6–7 суток), определяющие избирательность и скорость процессов фиторемедиации катионов тяжелых металлов из загрязненных вод с помощью ряски.

6. Рассчитаны величины адсорбционной емкости ряски ( $A_r$ ) по ИТМ, позволившие установить, что при воздействии ЭМИ КВЧ и определенной длительности выдержки ряски в растворе количество извлеченного фитомассой металла возрастает. Наибольшие значения ( $A_r$ , г/кг), составившие: по цинку – 0.247, по кадмию – 0.229 и по меди – 0.209 (что на 8–14 % больше, чем в контроле), получены после облучения растения в течение 15 минут.



7. Разработаны технологические рекомендации и предложена принципиальная схема, обеспечивающие при выбранных условиях минимизацию загрязнений и эффективную очистку воды от ИТМ методом фиторемедиации с применением энергии электромагнитного излучения крайне высокой частоты.

8. Дано эколого-экономическое обоснование процессов очистки сточных вод и рассчитан предотвращенный экологический ущерб при внедрении метода фиторемедиации при воздействии ЭМИ КВЧ диапазона. Показано, что с использованием ЭМИ КВЧ диапазона можно в более короткие сроки снизить загрязнение водных ресурсов тяжелыми металлами. Установлено, что извлечение только одного металла – меди, из смешанных стоков позволит получить экономический эффект в сумме ~ 22 тыс. руб. за 1 м<sup>3</sup> очищенной воды и ~ 590 тыс. руб. в год за счет экономии электроэнергии.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Русских, М.Л. Фиторемедиационные технологии в защите гидросферы [Текст]: **монография** / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, Ю.А. Тарушкина, А.В. Стоянов, М.Л. Русских. – Саратов: Изд-во Саратовского государственного технического университета, 2011. – 136 с.

### *В изданиях, рекомендованных ВАК:*

2. Русских, М.Л. Воздействие магнитного поля на процессы извлечения тяжелых металлов ряской [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, А.В. Стоянов // Известия вузов “Химия и химическая технология”. – 2010. – Т. 53. – № 9. – С. 87–91.

3. Русских, М.Л. Разработка энергосберегающей технологии доочистки промышленных и бытовых стоков от ионов тяжелых металлов [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 6. – С. 84–89.

4. Русских, М.Л. Воздействие ЭМИ КВЧ – диапазона на растения *Lemna M.* и их применение в очистке сточных вод [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских // Вестник СГТУ. – 2011. – № 4 (Вып. 2). – С. 197–201.

### *В зарубежных изданиях:*

5. Русских, М.Л. Очистка стоков от тяжелых металлов под действием электромагнитного излучения КВЧ-диапазона [Текст] / М.Л. Русских, Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева // Эколого-правовые и экономические аспекты техногенной безопасности регионов: материалы VI Международной научно-практической конференции при участии молодых ученых. – Харьков: ХНАДУ. – 2011. – С. 331–334.

6. Русских, М.Л. Воздействие квазивысоких частот на растения (ряска малая *LEMNA M*) и их применение в очистке сточных вод [Текст] / О.А. Арефьева, Л.Н. Ольшанская, М.Л. Русских // Вестник ХНАДУ: сб. научных трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – Вып. 52. – С. 64–69.

7. Русских, М.Л. Влияние геомагнитного поля на процесс фиторемедиации [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, А.В. Стоянов // Захист навколишнього середовища. Енергощадність. Збалансоване природокористування: збірник матеріалів 1 Міжнародн. конгресс. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2009. – С. 71–73.

8. Кулешова М.Л. Изучение влияния магнитного поля на процессы электрохимического извлечения тяжелых металлов ряской из сточных вод [Текст] / Л.Н. Ольшанская,

Н.А.Собгайда, М.Л. Кулешова, А.В. Стоянов // Вестник ХНАДУ: сб. научных трудов. Харьков: ХНАДУ, 2010. – Выпуск 48. – С. 69–72.

9. Русских, М.Л. Воздействие слабых электрических полей на процесс фиторемедиации [Текст] / Л.Н.Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, А.В. Стоянов // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: збірник матеріалів наукових статей V Міжнародна науково-практична конференція, м. Алушта АР Крим, Україна. Укр. НДІЕП. Х.: Райдер, 2009. Т. 1. – С. 278–281.

10. Русских, М.Л. Влияние природы аниона на процесс фиторемедиации ряской катиона меди [Текст] / Л.Н.Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, А.В. Стоянов // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: збірник матеріалів наукових статей V Міжнародна науково-практична конференція, м. Алушта АР Крим, Україна. Укр. НДІЕП. Х.: Райдер, 2009. – Т. 2. – С. 351–354.

11. Русских, М.Л. Изучение влияния магнитного поля на процессы биоэлектрохимического извлечения тяжелых металлов ряской из сточных вод [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, А.В. Стоянов // Эколого-правовые и экономические аспекты техногенной безопасности регионов: материалы Международной конференции студентов и молодых ученых. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – С. 69–72.

**В других изданиях:**

12. Русских, М.Л. Селективное извлечение тяжелых металлов ряской из смешанных сточных вод [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских, Е.Н. Тарасова // Экология – образование, наука промышленность и здоровье: сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – Ч.1. – С. 116–119.

13. Русских, М.Л. Влияние электромагнитного излучения на растения *LEMNA MINOR* в очистке сточных вод [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских // Актуальные проблемы электрохимической технологии: Сборник статей молодых ученых. – Саратов: ГАОУ ДПО “СарИПК и ПРО”, 2011. – Т 1. – С.276–282.

14. Русских, М.Л. Влияние электромагнитного поля КВЧ - диапазона на жизнедеятельность ряски малой (*Lemna m.*) и сорбцию ионов тяжелых металлов [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских // Техногенная и природная безопасность – ТПБ-2011: Сб. научн. трудов 1 Всероссийской научно-практической конференции. – Саратов: ИЦ Наука, 2011. – С.28 -31.

15. Русских, М.Л. Аккумуляция ионов кадмия, цинка и железа из сульфатных растворов ряской под воздействием электромагнитного поля КВЧ-диапазона [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских, Е.Н. Лыкина // Экология: синтез естественнонаучного, технического и гуманитарного знания: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. – С.115–116.

16. Русских, М.Л. Энергосберегающая технология очистки промышленных и бытовых стоков от тяжелых металлов [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских // Экологические проблемы промышленных городов: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с Международным участием: в 2 т. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2011. – Т. 2. – С 253–256.

17. Русских, М.Л. Технология очистки сточных вод с использованием электромагнитного излучения и водных растений [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых: в 2 т. – Саратов: СГТУ, 2010. – Т.2. – С. 51–54.

18. Русских, М.Л. Сочетанное влияние электрических и магнитных полей на процессы фиторемедиации [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология: Доклады Международной конференции “Композит–2010”. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 452–454.

19. Русских, М.Л. Влияние напряженности магнитного поля на процессы роста и размножения ряски малой [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева (ВУиТ), 2010. – С. 130–135.

20. Русских, М.Л. Обеспечение безопасности поверхности вод с использованием метода фиторемедиации [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, Л.А. Булкина // Проблемы обеспечения экономической безопасности: Материалы Международной научной конференции. – Энгельс: РИЦ ПКИ, 2010. – С.163–166.

21. Русских, М.Л. Оценка влияния электромагнитного излучения КВЧ-диапазона на аккумуляцию меди ряской LEMNAM. [Текст] / Л.Н. Ольшанская, О.А. Арефьева, М.Л. Русских // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Тольятти: ВУиТ, 2010. – С. 8–11.

22. Русских, М.Л. Влияние магнитного поля на процесс электрохимической фиторемедиации катионов меди из промывных вод [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, А.В. Стоянов // Проблемы обеспечения экологической безопасности: Материалы Международной научной конференции. – Энгельс: Ред. изд. центр ПКИ, 2010. – С. 159–162.

23. Русских, М.Л. Влияние магнитного поля на процесс электрохимической фиторемедиации катионов тяжелых металлов из стоков [Текст] / Л.Н. Ольшанская, М.Л. Русских, А.В. Стоянов // Инновации и актуальные проблемы техники и технологий: Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых: в 2 т. – Саратов: СГТУ, 2009. – Т. 1. С. 332–335.

24. Русских, М.Л. Влияние природы фитосорбента на процессы накопления и извлечения тяжелых металлов из сточных вод [Текст] / Л.Н. Ольшанская, Н.А. Собгайда, М.Л. Русских, Ю.А. Тарушкина // Татищевские чтения: Актуальные проблемы науки и практики: Материалы V юбилейной Международной научно-практической конференции. – Тольятти: ВУиТ, 2008. – С. 290–294.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю профессору Ольшанской Любови Николаевне, доцентам кафедры “Экология и охрана окружающей среды” СарГТУ Арефьевой Оксане Анатольевне, Собгайда Наталье Анатольевне, и инженеру кафедры Валиеву Ренату Шавкатовичу за постоянное внимание и полезные советы.

**РУССКИХ Марина Леонидовна**

**ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ВОД, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ  
МЕТАЛЛАМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ  
ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**Специальность 03.02.08 – экология (в химии и нефтехимии)**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Редактор Л.Ю. Горюнова  
Компьютерная верстка Д.Б. Фатеева, Е.В. Рязановой

Сдано в производство 15.02.12. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага типогр. №1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,18. Заказ № 2129. Тираж 100.

---

Пензенская государственная технологическая академия.  
440605, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1<sup>а</sup>/11.