

DOI 10.54596/2958-0048-2026-2-24-36

УДК 621:579.695

МРНТИ 55.01.91

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В УДАЛЕНИИ
ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ****Шустарева А.И.¹, Мищенко Д.А.^{1*}, Накиев Т.Р.¹, Голодова И.В.²**^{1*}*НАО «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»,
Петропавловск, Казахстан*^{2*}*ТОО «Научно-технологический центр воды», Петропавловск, Казахстан***Автор для корреспонденции: mishchenko.darya.0000@gmail.com***Аннотация**

В данной обзорной статье рассмотрены современные исследования, посвящённые проблеме загрязнения сточных вод машиностроительных предприятий тяжёлыми металлами и возможностям их биологической очистки с использованием микроводорослей. Проанализированы основные источники формирования промышленных сточных вод, их химический состав и ориентировочные показатели предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. Рассмотрены ограничения традиционных физико-химических методов очистки, включая высокие затраты, ограниченную эффективность и экологические риски. В работе подробно описаны механизмы биоремедиации с участием микроводорослей, включая процессы биосорбции, биоаккумуляции и комплексообразования. Освещены биологические особенности микроводорослей, роль функциональных групп клеточной стенки в связывании ионов металлов, а также влияние факторов среды на эффективность очистки.

Приведены данные о биологических характеристиках *Chlorella vulgaris*, устойчивости к загрязнению и высокой эффективности удаления тяжёлых металлов в различных условиях. Представлено сравнение эффективности различных видов микроводорослей. Проанализированы преимущества и ограничения микроводорослевой очистки с точки зрения экологической безопасности, экономической целесообразности и устойчивости к изменяющимся условиям среды.

В заключение сделан вывод о перспективности применения *Chlorella vulgaris* для экологически безопасной и экономически эффективной очистки сточных вод от тяжёлых металлов и подчеркнута необходимость дальнейших исследований в данной области.

Ключевые слова: микроводоросль, *Chlorella vulgaris*, сточные воды, машиностроительные предприятия, тяжёлые металлы, биосорбция, биоаккумуляция.

**МАШИНА ЖАСАУ КӘСІПОРЫНДАРЫНЫҢ АҒЫНДЫ СУЛАРЫНАН АУЫР
МЕТАЛДАРДЫ КЕТІРУДЕГІ МИКРОБАЛДЫРЛАРДЫҢ ТИІМДІЛІГІН
ЗЕРТТЕУ****Шустарева А.И.¹, Мищенко Д.А.^{1*}, Накиев Т.Р.¹, Голодова И.В.²**^{1*}*«Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ,
Петропавл, Қазақстан*^{2*}*«Су ғылыми-технологиялық орталығы» ЖШС, Петропавл, Қазақстан***Хат-хаттың үшін авторы: mishchenko.darya.0000@gmail.com***Аңдатпа**

Бұл шолу мақаласында машина жасау кәсіпорындарының ағынды суларының ауыр металдармен ластануы және микробалдырларды қолдана отырып, оларды биологиялық тазарту мүмкіндіктері туралы заманауи зерттеулер қарастырылған. Өнеркәсіптік сарқынды суларды қалыптастырудың негізгі көздері, олардың химиялық құрамы және ластаушы заттардың рұқсат етілген шекті концентрациясының болжамды

көрсеткіштері талданды. Дәстүрлі физика-химиялық тазарту әдістерінің шектеулері, соның ішінде жоғары шығындар, шектеулі тиімділік және экологиялық тәуекелдер қарастырылады, бұл балама технологияларды енгізу қажеттілігін негіздейді. Жұмыста биосорбция, биоаккумуляция және кешен түзілу процестерін қоса алғанда, микробалдырларды қамтитын биоремедиация механизмдері егжей-тегжейлі сипатталған. Микробалдырлардың биологиялық ерекшеліктері, металл иондарын байланыстырудағы жасуша қабырғасының функционалды топтарының рөлі, сондай-ақ қоршаған орта факторларының тазарту тиімділігіне әсері қамтылған.

Chlorella Vulgaris биологиялық сипаттамалары, ластануға төзімділігі және әртүрлі жағдайларда ауыр металдарды жоюдың жоғары тиімділігі туралы мәліметтер келтірілген. Микробалдырлардың әртүрлі түрлерінің тиімділігін салыстыру ұсынылған. Микробалдырды тазартудың артықшылықтары мен шектеулері экологиялық қауіпсіздік, экономикалық орындылық және қоршаған ортаның өзгеретін жағдайларына төзімділік тұрғысынан талданды.

Қорытындылай келе, *Chlorella vulgaris*-ті ауыр металдардан Ағынды суларды экологиялық таза және үнемді тазарту үшін қолданудың болашағы туралы қорытынды жасалды және осы салада одан әрі зерттеу қажеттілігі атап өтілді.

Кілт сөздер: микробалдырлар, *Chlorella vulgaris*, ағынды сулар, машина жасау кәсіпорындары, ауыр металдар, биосорбция, биоаккумуляция.

A STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF MICROALGAE IN REMOVING HEAVY METALS FROM WASTEWATER FROM MECHANICAL ENGINEERING PLANTS

A.I. Shustareva¹, D.A. Mishchenko^{1*}, T.R. Nakiyev¹, I.V. Golodova²

^{1*}*Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan*

^{2*}*Scientific and Technological Center of Water LLP, Petropavlovsk, Kazakhstan*

*Corresponding author: mishchenko.darya.0000@gmail.com

Abstract

This review article examines modern research on the problem of wastewater pollution from machine-building enterprises with heavy metals and the possibilities of their biological purification using microalgae. The main sources of industrial wastewater formation, their chemical composition and approximate maximum permissible concentrations of pollutants are analyzed. The limitations of traditional physico-chemical cleaning methods are considered. The work describes in detail the mechanisms of bioremediation involving microalgae, including the processes of biosorption, bioaccumulation and complexation.

Data on *Chlorella vulgaris* biological characteristics, resistance to contamination, and high efficiency of heavy metal removal under various conditions are presented. A comparison of the effectiveness of different types of microalgae is presented. The advantages and limitations of microalgae purification in terms of environmental safety, economic feasibility and resistance to changing environmental conditions are analyzed.

In conclusion, the use of *Chlorella vulgaris* for environmentally safe and cost-effective wastewater treatment from heavy metals is considered promising, and the need for further research in this area is emphasized.

Keywords: microalgae, *Chlorella vulgaris*, wastewater, mechanical engineering enterprises, heavy metals, biosorption, bioaccumulation.

Введение

Загрязнение водных ресурсов является актуальной проблемой современного мира, в частности, контаминация сточных вод тяжелыми металлами. Тяжёлые металлы, такие как медь (Cu), железо (Fe), цинк (Zn), попадают в воду посредством сброса конечных продуктов производства машиностроительных предприятий, образуя концентрированные отходы. Данные металлы обладают выраженной токсичностью и накапливаются в экосистемах, нанося ущерб здоровью человека и животных [1]. Будучи резистентными к разложению, они мигрируют и накапливаются в пищевых цепях,

отравляя целые организмы [1]. Попадая в организм человека, тяжёлые металлы поражают печень, почки, нервную систему, а также способны вызывать генетические мутации и канцерогенез в зависимости от концентрации и продолжительности воздействия [2]. Это подчёркивает остроту проблемы, требующей своевременного решения.

На данный момент существуют различные физико-химические методы очистки сточных вод от тяжёлых металлов: фильтрация с применением мембранных технологий, электрохимическая очистка, химическое осаждение и адсорбция. Однако данные методы имеют ряд недостатков: высокая стоимость, ограниченная эффективность в борьбе с комплексными соединениями металлов, низкая устойчивость адсорбентов при высоких концентрациях [3]. Альтернативным подходом является применение биологических методов. Таким методом является использование микроводорослей, обладающих следующими преимуществами: доступность, эффективность и экологичность. Микроводоросли способны аккумулировать и удерживать загрязняющие вещества, в том числе ионы металлов, их эффективность зависит от условий среды (температура, свет, pH, концентрация загрязнителей) и физиологического состояния клеток [4]. Применение *Chlorella vulgaris* является перспективным и экологически безопасным решением проблемы загрязнения сточных вод тяжёлыми металлами.

Сточные воды машиностроительных предприятий

Сточные воды машиностроительных предприятий содержат сложный комплекс органических и неорганических веществ. Сложные промышленные стоки характеризуются повышенной концентрацией тяжелых металлов, ПАВ и взвешенных веществ. Данные загрязнители попадают в сточные воды после путем гальванической и поверхностной обработки, в ходе механической обработки и металлообработки, а также из-за промывки и очистки деталей на производстве. В процессе металлообработки используются смазочно-охлаждающие жидкости, которые используют в ходе сверления и шлифования поверхности металлических конструкций. Частицы металла и абразивной пыли попадают в стоки вод, оказывая токсичное влияние. Использование обезжиривателей, ПАВ и растворителей при очистке и промывке техники и двигателей, также в последствие влияют на состав сточной воды [5]. Применение покрытий для поверхностной обработки деталей (хромирование, никелирование и т.д) использование растворов для гальваники служит основным источником загрязнения вод тяжёлыми ионами металлов (Fe, Cr, Zn, Cu, Cd), щелочами и кислотами, изменяющих pH среды [6]. Помимо вышеперечисленных источников существуют поверхностные стоки на территории предприятия, в составе которых имеются дорожная пыль, грязь, масла и смазки. Данные компоненты также попадают в основной сток, повышая степень загрязнения. В таблице 1 представлен основной состав сточных вод машиностроительных предприятий.

Таблица 1. Состав сточных вод машиностроительных предприятий [7, 8]

Источник	Основное вещество/металл	ПДК, мг/л (примерные показатели)*
Гальванические и поверхностные обработки	Cd	<0,005
Металлообработка (системы охлаждения)	Cu	<2,5

Промывка и очистка	ПАВ (обезжириватели)	<0,5
Поверхностные обработки	Zn	<4
Покрытия деталей	Ni, Cr	<0,5
Металлообработка	Взвешенные вещества (металлическая стружка)	<10
Металлообработка, покрытия	Fe	<1,0

*В данной таблице ПДК ориентировочные, так как в конкретных нормативных документах ПДК определяется индивидуально

Микроводоросли как средство биоремедиации. Основные механизмы очистки

Фиторемедиация – это процесс очищения среды от загрязнений при помощи водорослей. Микроводоросли являются эффективными биосорбентами для удаления загрязнений, включая тяжёлые металлы из сточных вод. Учёными доказано, что микроводоросли обладают высоким потенциалом в биоремедиации [9]. Способность к биосорбции обусловлена уникальным строением клеточной стенки и наличием в ней функциональных групп: сульфатной, карбоксильной, гидроксильной и аминогрупп, обеспечивающих высокую сорбционную ёмкость вне зависимости от физиологического состояния клеток. Механизмы биоаккумуляции и секреции хелатирующих веществ позволяют связывать и накапливать широкий спектр тяжёлых металлов. Эффективность адсорбции определяется внешними факторами (рН, состав среды, концентрация металлов, температура и освещённость). Авторы подчёркивают различие сорбционных параметров у разных штаммов микроводорослей, что важно при подборе вида для очистки вод с определённым составом металлосодержащих соединений [9]. Накопленная биомасса может быть использована повторно в качестве сырья для биоэнергетики – как источник биотоплива и биоудобрений [10].

Механизмы очистки включают биосорбцию и биоаккумуляцию. Биосорбция – пассивный метаболически независимый механизм связывания ионов металлов на поверхности клеточной стенки посредством электростатического притяжения и ионно-протонного обмена. Биоаккумуляция, в свою очередь, происходит путём активного транспорта: ионы тяжёлых металлов проникают внутрь клетки через мембранные пути, связываются с лигандами (пептидами, внутриклеточными белками) и иммобилизируются в вакуолях. Биоаккумуляция протекает значительно медленнее биосорбции [11]. В ряде случаев ионы металлов образуют малорастворимые соединения с сульфидными, нитратными и фосфатными ионами среды, которые связываются с биомассой и эффективно выводятся из раствора.

Для качественной сорбции необходимы: умеренный уровень рН, невысокая концентрация ионов металлов, высокая концентрация биомассы, длительное время контакта. При оптимальных условиях биосорбция и биоаккумуляция протекают значительно быстрее и эффективнее. Для повышения результативности применяются дополнительные методы: химически модифицированные клетки с расширенным набором функциональных групп, симбиотические системы с бактериями, иммобилизированные водоросли и наноконпозиты [11]. В таблице 2 представлены основные механизмы биоремедиации, включающие описательную характеристику и примеры металлов.

Таблица 2. Механизмы биоремедиации [12, 13, 14]

Механизм	Характеристика	Примеры тяжелых металлов
Биоаккумуляция	Внутриклеточное накопление ионов металла с энергетическими затратами.	Cd, Pb, Hg
Биосорбция	Метаболически независимый процесс. Физико-химическое связывание ионов металла с клеточной стенкой микроводоросли посредством активных центров (-ОН, -NH ₂ , -COOH) и внеклеточных полимерных субстанций (EPS). Макроскопический процесс включающий подтипы по механизму очищения.	Cu, Zn, Cr, Cd, Pb
Биопреципитация	Осаждение малорастворимых соединений металлов (сульфаты, сульфиды и т.д.) внутри или на поверхности клетки водоросли.	Cd, Pb
Комплексообразование	Подтип биосорбции. Образование устойчивых комплексов посредством химического связывания ионов металлов с функциональными группами на поверхности клетки.	Cu, Cr, Ni
Ионный обмен	Подтип механизма биосорбции. Включает конкретное связывание иона металла с конкретным ионом функциональной группы, расположенной на поверхности микроводоросли (Na ⁺ , Ca ²⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ и т.д.)	Zn, Cd, Pb
Белковое связывание	Процесс связывания ионов металлов с белками внутри клетки (металлотионеинами).	Zn, Cu, Cd

* Данные из таблицы зависят от условий эксперимента, поэтому являются ожидаемыми

В ходе процессов очистки у микроводорослей может развиваться окислительный стресс, обусловленный образованием активных форм кислорода при воздействии тяжёлых металлов. Это приводит к нарушениям фотосинтеза, повреждению мембран и замедлению клеточного роста. В ответ микроводоросли активируют антиоксидантную систему, нейтрализующую активные формы кислорода и усиливающую связывание ионов металлов. Продолжительное воздействие металлов индуцирует резистентность клеток, обусловленную внутриклеточной секвестрацией металлов и изменением экспрессии защитных генов [15].

Микроводоросль *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris – эукариотическая одноклеточная водоросль со сферической или эллипсоидной формой клеток размером 2–10 мкм. Клеточная стенка состоит из двуслойной полисахаридной матрицы – галактозы и рамнозы, – что обеспечивает

адаптационную устойчивость к воздействию внешних условий среды [16]. Данный вид получил широкое распространение в биотехнологических исследованиях как удобная технологическая модель для изучения процессов очистки загрязнённых вод. На рисунках 1 и 2 приведено изображение водоросли под микроскопом.

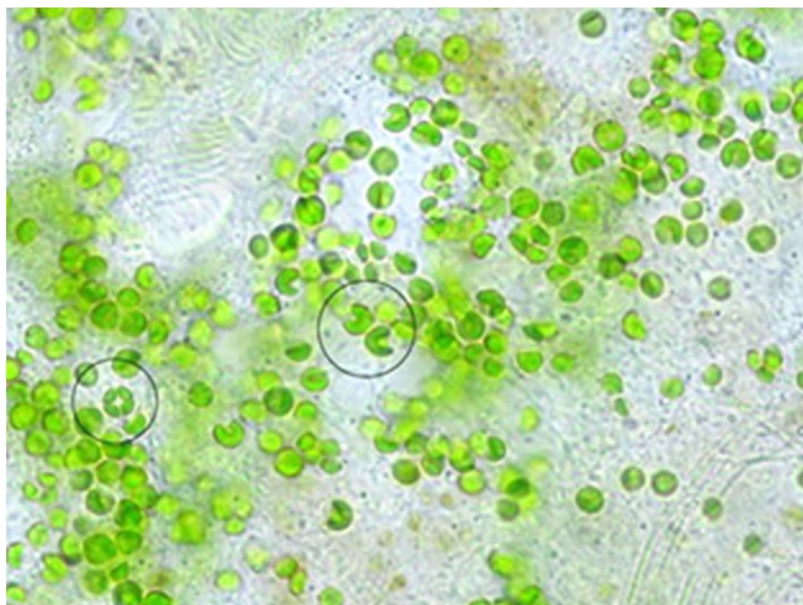


Рисунок 1. Водоросль *C. vulgaris* [17]

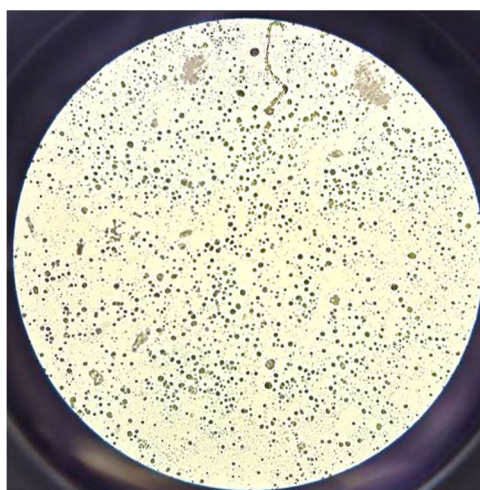


Рисунок 2. Микроводоросль *C. Vulgaris* при рассмотрении под микроскопом x10

Chlorella vulgaris является одним из наиболее эффективных и широко изученных биосорбентов для удаления тяжёлых металлов из сточных вод. По данным атомно-абсорбционной спектроскопии, эффективность удаления металлов составляет 65–99% в однокомпонентных культурах и 49–99% в многокомпонентных, что подтверждает преимущество данного штамма по биосорбционной способности [18, 19]. В таблице 3 приведены данные об эффективности *C. vulgaris* при воздействии на различные ионы

тяжёлых металлов, а также в таблице 4 приведено сравнение эффективности удаления тяжёлых металлов в сточных водах различных видов микроводорослей.

Таблица 3. Эффективность сорбции тяжёлых металлов *Chlorella vulgaris* [20, 21, 22]

Металл	Тип воды и условия	Эффективность удаления	Характеристика
Ni ²⁺ , Pb ²⁺ , Zn ²⁺ , Cd ²⁺ , Cu ²⁺	Лабораторные модели вод в контролируемых условиях	Однокомп. культуры: 65–99% (3-й день); 72–99% (7-й день)	Высокая адсорбция в однокомпонентных системах. С ростом концентрации металлов действие микроводорослей замедляется.
Fe ²⁺	Модель сточной воды машиностроительного предприятия	≈ 83,59%	Эффективная биосорбция посредством активной поверхности микроводорослей.
Mn ²⁺	Синтетическая модельная сточная вода	≈ 74,60%	Активность адсорбции зависит от концентрации биомассы и времени контакта.
Zn ²⁺	Смоделированные условия сточных вод	≈ 78,98%	Высокая степень сорбционности.
Pb ²⁺	Лабораторная имитация сточных вод	Многокомп. культуры: 48–99%	Зависимость от условий среды. Снижение активности из-за конкуренции с Cu и Zn.
Cd ²⁺	Лабораторная модель. Широкий диапазон концентраций.	≈ 57–96%	Устойчиво высокий уровень внутриклеточных механизмов.
Cu ²⁺	Искусственно созданные условия	≈ 89–99%	Повышенная активность биосорбента. Причина — высокая аффинность к функциональным группам.
Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺ , Ni ²⁺	Промышленные условия (лабораторный контроль)	>60–80%	Данные по сложным водам (точность варьируется).
Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺ , Ni ²⁺	Модели вод с нанокompозитами <i>Chlorella</i>	Повышение эффективности	Добавление нанокompозитов усиливает адсорбцию.

Таблица 4. Сравнение эффективности удаления тяжёлых металлов из сточных вод различными видами микроводорослей [23,24,25]

Вид микроводоросли	Металл	Эффективность	Характеристика
<i>Chlorella vulgaris</i>	Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺ , Mn ²⁺	Zn – 79% Fe – 84% Mn – 75% Pb/Cd/Cu – до 99%	Высокая степень биосорбции. Быстрый рост биомассы. Высокая активность функциональных групп (–COOH, –OH, –NH ₂). Эффективно для моно- и поликомпонентных систем.
<i>Chlorella kessleri</i>	Cd ²⁺ , Pb ²⁺	Cd – 95% Pb – 99,5%	Повышенная резистентность к металлам. Оптимальная сорбция в RSM/CSA-моделях.
<i>Sargassum angustifolium</i>	Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , Mn ²⁺	Zn – 70–75% Fe – 72–78% Mn – 65%	Адсорбция проявляется только в модельных растворах.
<i>Tetraselmis obliquus</i>	Cu ²⁺ , Fe ²⁺	Cu – 90% Fe – 97,9%	Высокая степень сорбции металлов. Доказана эффективность в промышленных стоках горячей прокатки.
<i>Spirulina platensis</i>	Fe ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ⁶⁺	Fe – 97% Cu – 90% Cr – 90%	Средняя сорбционная активность при фиксированной биомассе. Предпочтительна для стоков с высоким содержанием органики.
<i>Scenedesmus sp./quadricauda</i>	Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Ni ²⁺ , Pb ²⁺	Cu – 80–90% Zn – 73–83% Ni – 81–91% Pb – 80–90%	Преимущество в удалении нескольких металлов одновременно. Высокая устойчивость в batch/MBR-системах.

Экономический анализ технологии

Экономическая эффективность – один из ключевых факторов при выборе технологии очистки сточных вод на машиностроительных предприятиях. Традиционные физико-химические методы (химическое осаждение, ионный обмен, адсорбция) характеризуются высокой стоимостью реагентов, значительными энергетическими затратами и необходимостью регулярной замены расходных материалов, а также образованием вторичных отходов, требующих дополнительной утилизации.

Сравнительная характеристика капитальных и эксплуатационных затрат различных технологий очистки представлена в таблице 5. Ориентировочные показатели приведены в национальной валюте Республики Казахстан.

Таблица 5. Сравнение затрат на очистку сточных вод от тяжёлых металлов

Показатель	Физико-химическая очистка	Мембранные технологии (MBR/UF)	Биологическая очистка (микроводоросли)
Капитальные затраты	Высокие	Очень высокие	Средние
Стоимость установки	15 000 000 - 30 000 000 Тг *	30 000 000 – 70 000 000 Тг *	10 000 000 - 40 000 000 Тг *
Затраты на эксплуатацию (Тг/м ³)	40 - 140 Тг/м ³ *	80 - 210 Тг/м ³ *	30 - 120 Тг/м ³ *
Стоимость расходных материалов	Высокие (коагулянты, флокулянты)	Средние (мембраны, промывки)	Минимальные (биомасса регенерируется)
Энергопотребление	Среднее	Высокое	Низкое
Образование отходов / шлака	Высокое	Среднее	Низкое
Дополнительные выгоды	Нет	Частично	Возможность вторичного использования биомассы (биотопливо, удобрения)
Оценочный срок окупаемости	5-10 лет	7-12 лет	4-8 лет

*Показатели ориентировочные; точные значения определяются проектной документацией.

С точки зрения финансовой нагрузки внедрение *Chlorella vulgaris* демонстрирует конкурентоспособность как по капитальным, так и по операционным показателям. Первоначальные вложения охватывают обустройство фотобиореакторных установок, организацию освещения, систем газообмена и контроля культуральных параметров. При этом текущие расходы на реагенты минимальны: ключевым агентом служит постоянно воспроизводимая биомасса [26].

Важным преимуществом является возможность многократного использования биомассы. По завершении аккумуляции ионов металлов сорбент регенерируется посредством десорбционных процедур, высокотемпературной обработки или специализированной переработки, что сокращает потребность в замене биоматериала и снижает эксплуатационные издержки.

Дополнительный экономический эффект достигается за счёт конверсии отработанной биомассы в биотопливо, биогаз или органические удобрения, что позволяет частично компенсировать затраты на водоочистку и формирует замкнутый ресурсный цикл. При умеренных и невысоких концентрациях загрязнителей

микроводорослевые системы способны снизить совокупные расходы на 20-40% относительно традиционных методов в долгосрочной перспективе. Финансовая выгода наиболее ощутима при значительных объемах стоков и длительных сроках эксплуатации, когда первоначальные инвестиции амортизируются на фоне низких операционных затрат. При грамотно выстроенном технологическом регламенте затраты на развёртывание системы, как правило, окупаются в течение нескольких лет непрерывной эксплуатации.

Заключение

В ходе проведённого исследования изучена роль биологических методов в очистке промышленных сточных вод от тяжёлых металлов. Установлен основной состав и предельно допустимые концентрации ионов тяжёлых металлов в стоках машиностроительных предприятий. Анализ литературных источников подтвердил, что микроводоросли обладают высокой биоремедиационной способностью, реализуемой через механизмы биоаккумуляции и биосорбции.

Сравнительный анализ нескольких штаммов позволил выявить наиболее эффективный вид – *Chlorella vulgaris*, демонстрирующий наилучшие показатели снижения концентрации ионов тяжёлых металлов: 65–99% в однокомпонентных и 49–99% в многокомпонентных системах. Экономический анализ подтвердил перспективность данной технологии: при длительной эксплуатации и значительных объемах стоков возможно снижение совокупных расходов на 20–40% относительно физико-химических методов. Вторичное использование биомассы как сырья для биотоплива, биогаза и органических удобрений обеспечивает замкнутый ресурсный цикл.

Таким образом, применение *Chlorella vulgaris* представляет собой перспективное, экологически безопасное и экономически обоснованное решение проблемы загрязнения сточных вод машиностроительных предприятий тяжёлыми металлами. Вместе с тем необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию условий культивирования, масштабирование технологии до промышленных объёмов и разработку эффективных схем регенерации биомассы.

Литература:

1. Alloway B.J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability. - Dordrecht: Springer, 2013. - 614 с. - <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
2. Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J. Heavy Metals Toxicity and the Environment // EXS. - 2012. - Том 101. - С. 133-164. - https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
3. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater: A Comprehensive and Critical Review // npj Clean Water. - 2021. - Том 4. - Статья 36. - <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
4. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // Water. - 2024. - Том 16, № 5. - Статья 718. - <https://doi.org/10.3390/w16050718>
5. Metal Processing Wastewater Components // Almawatech. - URL: <https://www.almawatech.com/en/waste-water/metal-processing/> (дата обращения: 20.02.26).
6. Sources of Heavy Metals in Industrial Wastewater // Almawatech. - URL: <https://www.almawatech.com/en/waste-water/heavy-metals/> (дата обращения: 22.02.26).
7. Классификация компонентов сточных вод // Промышленные и другие виды сточных вод. - ISSN 1728-8975. - URL: <https://rmebrk.kz/journals/703/25946.pdf> (дата обращения: 04.03.26).

8. Тяжелые металлы в пресных водах Казахстана и методологические подходы. - URL: https://ks.dku.kz/documents/67/7_Heavy_Metals_in_Fresh_Waters_of_Kazakhstan_and_Methodological_Approaches_RUS.pdf (дата обращения: 11.03.26).
9. Leong Y.K., Chang J.-S. Bioremediation of Heavy Metals Using Microalgae: Recent Advances and Mechanisms // *Bioresource Technology*. - 2020. - Том 303. - Страницы 122886. - <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122886>
10. Al-Jabri H., Das P., Khan S., Thaher M., AbdulQuadir M. Treatment of Wastewaters by Microalgae and the Potential Applications of the Produced Biomass: A Review // *Water*. - 2021. - Том 13, № 1. - Страницы 27. - <https://doi.org/10.3390/w13010027>
11. Xu K., Du M., Yao R., Luo J., Chen Z., Li C., Lei A., Wang J. Microalgae-Mediated Heavy Metal Removal in Wastewater Treatment: Mechanisms, Influencing Factors, and Novel Techniques // *Algal Research*. - 2024. - Том 82. - Страницы 103645. - <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103645>
12. Yang X.-Y., Wei Y.-X., Su Y.-Q., Zhang Z.-W., Tang X.-Y., Chen Y.-E., Yuan M., Yuan S. The Strategies Microalgae Adopt to Counteract the Toxic Effect of Heavy Metals // *Microorganisms*. - 2025. - Том 13, № 5. - Страницы 989. - <https://doi.org/10.3390/microorganisms13050989>
13. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // *Water*. - 2024. - Том 16, № 5. - Страницы 718. - <https://doi.org/10.3390/w16050718>
14. Aslam A., Kanwal F., Javied S. et al. Microbial Biosorption: A Sustainable Approach for Metal Removal and Environmental Remediation // *International Journal of Environmental Science and Technology*. - 2025. - Том 22. - С. 13245-13276. - <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06611-1>
15. Xiao X., Li W., Jin M., Zhang L., Qin L., Geng W. Responses and Tolerance Mechanisms of Microalgae to Heavy Metal Stress: A Review // *Marine Environmental Research*. - 2023. - Том 183. - Страницы 105805. - <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105805>
16. Зайцев В.В., Петряков В.В., Зайцева Л.М., Махимова Ж.Н. Влияние питательной среды на морфологические особенности и жизнеспособность клеток микроводоросли *Chlorella vulgaris* Beijer // Самарский научный вестник. - 2022. - Том 11, № 2. - С. 52-56. - <https://doi.org/10.55355/snvt2022112107>
17. Микроводоросль *Chlorella vulgaris*. - URL: <https://bioaa.info/index.php/186-2010-01-28-12-03-56> (дата обращения: 02.04.26).
18. Kyrtzopoulou E., Kyzaki N., Malletzidou L., Nerantzis E., Kazakis N.A. The Efficiency of *Chlorella vulgaris* in Heavy Metal Removal: A Comparative Study of Mono- and Multi-Component Metal Systems // *Clean Technologies*. - 2025. - Том 7, № 2. - Страницы 35. - <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>
19. Киреева Н.А., Кабиров Т.Р., Дубовик И.Е. Комплексное биотестирование нефтезагрязненных почв // Теоретическая и прикладная экология. - 2007. - № 1. - С. 65-69. - <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2007-1-041-45>
20. Kyrtzopoulou E., Kyzaki N., Malletzidou L., Nerantzis E., Kazakis N.A. The Efficiency of *Chlorella vulgaris* in Heavy Metal Removal: A Comparative Study of Mono- and Multi-Component Metal Systems // *Clean Technologies*. - 2025. - Том 7, № 2. - Страницы 35. - <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>
21. Reda M. Heavy Metals Removal by Using *Chlorella vulgaris* Microalgae/Zinc Oxide Nanocomposite for Wastewater Treatment in Menyet El-Nasr, Egypt // *Biochemistry Letters*. - 2023. - Том 19, № 1. - С. 27-36. - <https://doi.org/10.21608/blj.2023.294659>
22. Mosleh Y., Mofeed J., Heham S., Nafea E.S. Eco-Friendly Biosorption of Heavy Metals by *Chlorella vulgaris*: A Green Solution for Wastewater Remediation // *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. - 2025. - <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.433979>
23. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // *Water*. - 2024. - Том 16, № 5. - Страницы 718. - <https://doi.org/10.3390/w16050718>
24. Yang X.-Y., Wei Y.-X., Su Y.-Q., Zhang Z.-W., Tang X.-Y., Chen Y.-E., Yuan M., Yuan S. The Strategies Microalgae Adopt to Counteract the Toxic Effect of Heavy Metals // *Microorganisms*. - 2025. - Том 13, № 5. - Страницы 989. - <https://doi.org/10.3390/microorganisms13050989>
25. Pradana A.B., Vuchori L., Pratama W.D., Pratiwi W.Z., Hadiyanto. Immobilized Algae for Heavy Metals Remediation in Textile Wastewater // *Journal of Emerging Science and Engineering*. - 2023. - Том 1, № 2. - С. 51-56. - <https://doi.org/10.61435/jese.2023.10>
26. Карпов М.В., Наумова О.В., Жиздюк А.А., Мальшева А.А. Перспективы использования культивируемых водорослей хлореллы при доочистке и обеззараживании сточных вод на

очистных сооружений // Аграрный научный журнал. - 2023. - № 1. - С. 150-154. - <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i1pp150-154>

References:

1. Alloway B.J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability. - Dordrecht: Springer, 2013. - 614 p. - <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
2. Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J. Heavy Metals Toxicity and the Environment // EXS. - 2012. - Vol. 101. - P. 133-164. - https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
3. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater: A Comprehensive and Critical Review // npj Clean Water. - 2021. - Vol. 4. - Article 36. - <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
4. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // Water. - 2024. - Vol. 16, No. 5. - Article 718. - <https://doi.org/10.3390/w16050718>
5. Metal Processing Wastewater Components // Almwatech. - URL: <https://www.almwatech.com/en/waste-water/metal-processing/> (accessed: 20.02.26).
6. Sources of Heavy Metals in Industrial Wastewater // Almwatech. - URL: <https://www.almwatech.com/en/waste-water/heavy-metals/> (accessed: 22.02.26).
7. Classification of Wastewater Components // Industrial and Other Types of Wastewater. - ISSN 1728-8975. - URL: <https://rmebrk.kz/journals/703/25946.pdf> (accessed: 04.03.26).
8. Heavy Metals in Fresh Waters of Kazakhstan and Methodological Approaches. - URL: https://ks.dku.kz/documents/67/7_Heavy_Metals_in_Fresh_Waters_of_Kazakhstan_and_Methodological_Approaches_RUS.pdf (accessed: 11.03.26).
9. Leong Y.K., Chang J.-S. Bioremediation of Heavy Metals Using Microalgae: Recent Advances and Mechanisms // Bioresource Technology. - 2020. - Vol. 303. - Article 122886. - <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122886>
10. Al-Jabri H., Das P., Khan S., Thaher M., AbdulQuadir M. Treatment of Wastewaters by Microalgae and the Potential Applications of the Produced Biomass: A Review // Water. - 2021. - Vol. 13, No. 1. - Article 27. - <https://doi.org/10.3390/w13010027>
11. Xu K., Du M., Yao R., Luo J., Chen Z., Li C., Lei A., Wang J. Microalgae-Mediated Heavy Metal Removal in Wastewater Treatment: Mechanisms, Influencing Factors, and Novel Techniques // Algal Research. - 2024. - Vol. 82. - Article 103645. - <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103645>
12. Yang X.-Y., Wei Y.-X., Su Y.-Q., Zhang Z.-W., Tang X.-Y., Chen Y.-E., Yuan M., Yuan S. The Strategies Microalgae Adopt to Counteract the Toxic Effect of Heavy Metals // Microorganisms. - 2025. - Vol. 13, No. 5. - Article 989. - <https://doi.org/10.3390/microorganisms13050989>
13. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // Water. - 2024. - Vol. 16, No. 5. - Article 718. - <https://doi.org/10.3390/w16050718>
14. Aslam A., Kanwal F., Javied S. et al. Microbial Biosorption: A Sustainable Approach for Metal Removal and Environmental Remediation // International Journal of Environmental Science and Technology. - 2025. - Vol. 22. - P. 13245-13276. - <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06611-1>
15. Xiao X., Li W., Jin M., Zhang L., Qin L., Geng W. Responses and Tolerance Mechanisms of Microalgae to Heavy Metal Stress: A Review // Marine Environmental Research. - 2023. - Vol. 183. - Article 105805. - <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105805>
16. Zaitsev V.V., Petryakov V.V., Zaitseva L.M., Makhimova Zh.N. Influence of Nutrient Medium on Morphological Features and Cell Viability of Microalgae *Chlorella vulgaris* Beijer // Samara Scientific Bulletin. - 2022. - Vol. 11, No. 2. - P. 52-56. - <https://doi.org/10.55355/sn2022112107>
17. Microalgae *Chlorella vulgaris*. - URL: <https://bioaa.info/index.php/186-2010-01-28-12-03-56> (accessed: 02.04.26).
18. Kyratzopoulou E., Kyzaki N., Malletzidou L., Nerantzis E., Kazakis N.A. The Efficiency of *Chlorella vulgaris* in Heavy Metal Removal: A Comparative Study of Mono- and Multi-Component Metal Systems // Clean Technologies. - 2025. - Vol. 7, No. 2. - Article 35. - <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>
19. Kireeva N.A., Kabirov T.R., Dubovik I.E. Complex Biotesting of Oil-Contaminated Soils // Theoretical and Applied Ecology. - 2007. - No. 1. - P. 65-69. - <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2007-1-041-45>

20. Kyrtzopoulou E., Kyzaki N., Malletzidou L., Nerantzis E., Kazakis N.A. The Efficiency of *Chlorella vulgaris* in Heavy Metal Removal: A Comparative Study of Mono- and Multi-Component Metal Systems // *Clean Technologies*. - 2025. - Vol. 7, No. 2. - Article 35. - <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>
21. Reda M. Heavy Metals Removal by Using *Chlorella vulgaris* Microalgae/Zinc Oxide Nanocomposite for Wastewater Treatment in Menyet El-Nasr, Egypt // *Biochemistry Letters*. - 2023. - Vol. 19, No. 1. - P. 27-36. - <https://doi.org/10.21608/blj.2023.294659>
22. Mosleh Y., Mofeed J., Heham S., Nafea E.S. Eco-Friendly Biosorption of Heavy Metals by *Chlorella vulgaris*: A Green Solution for Wastewater Remediation // *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. - 2025. - <https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.433979>
23. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N.H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // *Water*. - 2024. - Vol. 16, No. 5. - Article 718. - <https://doi.org/10.3390/w16050718>
24. Yang X.-Y., Wei Y.-X., Su Y.-Q., Zhang Z.-W., Tang X.-Y., Chen Y.-E., Yuan M., Yuan S. The Strategies Microalgae Adopt to Counteract the Toxic Effect of Heavy Metals // *Microorganisms*. - 2025. - Vol. 13, No. 5. - Article 989. - <https://doi.org/10.3390/microorganisms13050989>
25. Pradana A.B., Buchori L., Pratama W.D., Pratiwi W.Z., Hadiyanto. Immobilized Algae for Heavy Metals Remediation in Textile Wastewater // *Journal of Emerging Science and Engineering*. - 2023. - Vol. 1, No. 2. - P. 51-56. - <https://doi.org/10.61435/jese.2023.10>
26. Karpov M.V., Naumova O.V., Zhizdyuk A.A., Malysheva A.A. Prospects for the Use of Cultivated *Chlorella* Algae in Additional Treatment and Disinfection of Wastewater at Treatment Facilities // *Agrarian Scientific Journal*. - 2023. - No. 1. - P. 150-154. - <https://doi.org/10.28983/asj.v2023i1pp150-154>

Information about the authors

Shustareva A.I. - student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: sustarevaanastasia@gmail.com
Mishchenko D.A. - corresponding author, student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: mishchenko.darya.0000@gmail.com
Nakiyev T.R. – Senior Lecturer, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Master's Degree, Kozybayev University, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: talgat03021979@mail.ru
Golodova I.V. - Head of the Laboratory of Scientific and Technological Center of Water LLP, KHN, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: igolodova@inbox.ru