

---

---

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2026-1-17-27.2>

МРНТИ 87.03.29

УДК 628.35:582.26:546.56(575.1)

И. К. Каюмова<sup>\*1</sup>, С. М. Турабджанов<sup>2</sup>, Д. Д. Абдурахманов<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Докторант (Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан; [kayumova.iroda@inbox.ru](mailto:kayumova.iroda@inbox.ru))

<sup>2</sup> Д. т. н., профессор, ректор (Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан; [tur\\_sad@mail.ru](mailto:tur_sad@mail.ru))

<sup>3</sup> Начальник отдела охраны окружающей среды  
(АО «Алмалыкский ГМК», Ташкент, Узбекистан; [d.abdurahmanov@agmk.uz](mailto:d.abdurahmanov@agmk.uz))

## ИССЛЕДОВАНИЕ БИОСОРБЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ РОДА ХЛОРЕЛЛА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

**Аннотация.** В условиях возрастающей антропогенной нагрузки на водные экосистемы, особенно в промышленно развитых регионах, разработка эффективных методов очистки сточных вод является ключевой задачей водного хозяйства. Представлены результаты разработки экологически безопасной технологии очистки сточных вод металлургических производств от ионов меди (Cu(II)) с использованием биосорбционного потенциала одноклеточных зеленых микроводорослей рода *Chlorella*. Экспериментально изучены толерантность и биосорбционная способность штаммов *Chlorella vulgaris* и *Chlorella pyrenoidosa*, адаптированных к высоким концентрациям меди. Разработана и успешно апробирована в полупромышленных условиях на примере одного из крупнейших промышленных узлов Центральной Азии – ОАО "Алмалыкский горно-металлургический комбинат" (АГМК) пилотная технологическая схема биологической доочистки сточных вод. Показана экономическая и экологическая целесообразность применения биосорбции на основе *Chlorella* для снижения техногенной нагрузки на водные объекты и улучшения качества водных ресурсов в регионах с развитой металлургической промышленностью.

**Ключевые слова:** биосорбция, ионы меди, сточные воды, микроводоросли, *Chlorella*, тяжелые металлы, очистка воды, водные ресурсы, география загрязнения, биоремедиация.

**Введение.** Интенсивное развитие промышленности, в особенности металлургического сектора, в таких регионах, как Центральная Азия, сопровождается значительным увеличением объема высокотоксичных сточных вод, что создает серьезную угрозу качеству водных ресурсов [1, 2]. Сточные воды металлургических и гальванических производств характеризуются комплексным загрязнением, среди которого особую опасность для гидробионтов и безопасности водопользования представляют тяжелые металлы. Ионы меди Cu(II) являются одним из наиболее распространенных и токсичных компонентов таких стоков. Обладая высокой растворимостью, биологической активностью и способностью к биоаккумуляции в водных экосистемах и донных отложениях, Cu(II) даже в низких концентрациях оказывают негативное воздействие на водные экосистемы и здоровье человека, что делает проблему их удаления особо актуальной в контексте охраны и рационального использования водных ресурсов [3, 4].

Традиционные технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов (химическое осаждение, коагуляция, ионный обмен) демонстрируют высокую эффективность, но имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих их устойчивое применение: высокие энергозатраты, необходимость

использования химических реагентов, образование больших объемов вторичных отходов (шламов), требующих специальных полигонов для захоронения, и относительно высокая стоимость эксплуатации [5, 6]. В этой связи разработка и внедрение альтернативных, экологически безопасных и экономически целесообразных технологий, соответствующих принципам «зеленой» экономики, является актуальной научно-практической задачей в области защиты водных ресурсов.

На станциях аэрации аэротенки с микроводорослями работают по принципу симбиотической системы, где водоросли и активный ил взаимно усиливают очистку. В отличие от традиционных аэротенков, где кислород для аэробных бактерий подается механически через аэраторы, в таких системах микроводоросли в процессе фотосинтеза естественным образом насыщают воду кислородом, необходимым для окисления активным илом органических загрязнений и нитрификации аммонийного азота. Взамен бактерии активного ила поставляют водорослям углекислый газ и продукты разложения органики как источник питательных веществ. Этот синергетический эффект позволяет снизить энергозатраты на аэрацию, интенсифицировать процесс удаления азота и фосфора, а также повысить стабильность работы системы, поддерживая параметры иловой смеси (дозу ила 1-3 г/л, возраст ила 5-10 сут, растворенный кислород не менее 2-4 мг/л) [7] в оптимальном диапазоне без использования исключительно механического аэрирования [8, 9].

Как показано на рисунке 1, исследуемые аэротенки представляют собой типовые сооружения, используемые на станциях аэрации в условиях Узбекистана.



Рисунок 1 – Внешний вид аэротенков на станции аэрации (Узбекистан)

Figure 1 – External view of aeration tanks at the aeration station (Uzbekistan)

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является биосорбция – природный процесс поглощения и концентрирования загрязняющих веществ биологическими материалами [10, 11]. В качестве биосорбентов широко исследуются различные микроорганизмы, включая бактерии, грибы и микроводоросли [12, 13]. Среди них микроводоросли, в частности представители рода *Chlorella*, привлекают особое внимание благодаря высокой скорости роста, способности накапливать значительные количества металлов на клеточной стенке, содержащей разнообразные функциональные группы (карбоксильные, гидроксильные, амино-фосфатные), а также возможности культивирования в различных условиях, включая сточные воды, что открывает перспективы для их использования в системах биомелиорации водных объектов [14, 15].

Несмотря на наличие ряда исследований [16-18], посвященных биосорбции металлов микроводорослями, вопросы, связанные с применением локально адаптированных штаммов *Chlorella* для очистки высококонцентрированных медьсодержащих сточных вод именно металлургических производств в условиях Центральной Азии, изучены недостаточно. Цель настоящего исследования – разработка и апробация технологии биосорбционной очистки сточных вод от ионов  $\text{Cu(II)}$  с использованием штаммов *Chlorella vulgaris* и *Chlorella pyrenoidosa* для снижения антропогенной нагрузки на водные ресурсы, включая изучение механизмов сорбции, кинетики и изотерм процесса в условиях, приближенных к производственным [19].

Географически загрязнение сосредоточено в промышленных зонах Ташкентской, Навоийской и Ферганской областей Республики Узбекистан, где расположены крупные металлургические комбинаты. Эта технология экологически безопасна и экономически выгодна, особенно в условиях субтропического климата Узбекистана, благоприятного для культивирования водорослей.

В глобальном масштабе проблема очистки сточных вод от тяжелых металлов актуальна в связи с промышленным ростом. Объемы сточных вод от металлургии увеличиваются, что приводит к загрязнению поверхностных и подземных вод. Ионы Cu(II) токсичны даже в низких концентрациях, нарушая жизнедеятельность водных организмов.

**Материалы и методы исследования.** Изучались штаммы одноклеточных зеленых микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Chlorella pyrenoidosa*, выделенные и адаптированные к повышенным концентрациям меди в местных экологических условиях.

Использованы реальные сточные воды Алмалыкского горно-металлургического комбината (АГМК), расположенного в Ташкентской области Узбекистана. Сточные воды комбината характеризуются высоким содержанием ионов Cu(II) (стабильное превышение ПДК [20] для водных объектов рыбохозяйственного значения в несколько раз).

**Методы культивирования и адаптации микроводорослей.** Культивирование *Chlorella* проводилось в жидкой питательной среде Бристоль в лабораторных условиях при температуре  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , непрерывном освещении люминесцентными лампами (интенсивность фотосинтетически активной радиации  $60 \mu\text{mol фотонов}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) и аэрации [21, 22]. Для получения устойчивых к меди культур, способных функционировать в условиях реальных стоков, проводилась поэтапная адаптация штаммов путем культивирования в средах с постепенно повышающейся концентрацией Cu(II) от 5 до 30 мг/л. Отбирались культуры, демонстрирующие наивысшую выживаемость и скорость роста в стрессовых условиях [23, 24].

**Методы анализа.** Опыты по биосорбции проводились в колбах Эрленмейера, содержащих сточные воды с заданной начальной концентрацией Cu(II). В систему вносилась заданная доза биомассы и поддерживались определенные условия (рН, температура, освещенность, перемешивание). Пробы отбирались через заданные промежутки времени для построения кинетических кривых. Влияние таких факторов, как начальный рН (2,0–8,0), начальная концентрация металла (5–1000 мг/л), доза биосорбента (0,5–5,0 г/л) и время контакта (5 мин – 7 сут), изучалось в серии последовательных экспериментов для определения оптимальных параметров процесса [25, 26].

Для повышения механической прочности, удобства отделения биосорбента от очищенной воды и возможности его регенерации в условиях потока биомасса *Chlorella* иммобилизовывалась в гелевые шарики на основе альгината кальция. Для этого суспензию водорослей смешивали с раствором альгината натрия (3–4%), полученную смесь капельно вводили в раствор  $\text{CaCl}_2$  (0,1 М) для образования сферических гранул диаметром 3–4 мм [27, 28].

Концентрация ионов меди в растворах до и после биосорбции определялась методами атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с использованием спектрометра Varian AA20+ и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) для получения высокоточных данных [20, 30]. Для наблюдения за морфологией клеток и визуализации накопления металла применялась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Плотность клеточной суспензии определялась прямым подсчетом в камере Горяева [31].

Экспериментальные данные по кинетике и равновесию обрабатывались с использованием математических моделей, широко применяемых для описания сорбционных процессов в водных средах.

*Модели псевдопервого и псевдвторого порядка [25, 26].*

Уравнение Лангмюра:

$$q_e = \frac{q_{max} \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e},$$

где  $q_e$  – равновесная емкость сорбента, мг/г;  $q_{max}$  – максимальная ёмкость монослоя, мг/г;  $K_L$  – константа Лэнгмюра,  $\text{дм}^3/\text{мг}$ ;  $C_e$  – равновесная концентрация в растворе,  $\text{мг}/\text{дм}^3$ .

Уравнение Фрейндлиха:

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n},$$

где  $K_F$  и  $n$  – эмпирические константы, характеризующие емкость сорбции и интенсивность процесса.

Количество сорбированного металла рассчитывалось по формуле

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m},$$

где  $C_0$  и  $C_e$  – начальная и равновесная концентрация  $Cu(II)$  в растворе, мг/л;  $V$  – объём раствора,  $dm^3$ ;  $m$  – масса сухой биомассы, г.

Все эксперименты проводили в трёхкратной биологической повторности.

**Результаты.** Скрининг показал, что штаммы *Chlorella vulgaris* и *Chlorella pyrenoidosa* обладают значительной природной толерантностью к ионам меди. Однако для эффективной работы в условиях высоких концентраций (до 30 мг/л), характерных для сточных вод АГМК, потребовалась направленная адаптация. В процессе поэтапного повышения концентрации  $Cu(II)$  в питательной среде было отобрано несколько устойчивых культур. Адаптированные штаммы демонстрировали восстановление фотосинтетической активности на 60–85% в течение 5-дневного периода роста даже в присутствии металла, в то время как неадаптированные культуры подавлялись.

В работе использовались чистые культуры микроводорослей, как видно из (рисунок 2), применяемые в эксперименте штаммы *Chlorella* имеют характерную для рода сферическую форму и гладкую клеточную стенку.

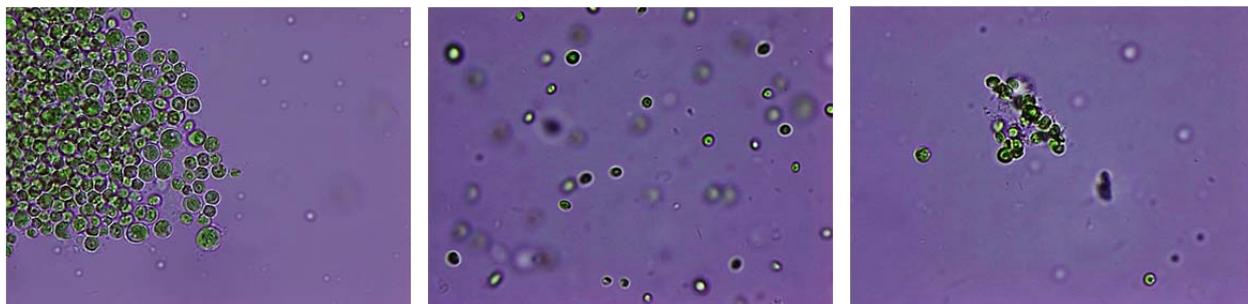


Рисунок 2 – Микроскопический вид чистых культур микроводорослей *Chlorella*, используемых в исследовании (световая микроскопия,  $\times 400$ , сферические клетки диаметром 3–8 мкм, ярко-зелёная окраска)

Figure 2 – Microscopic view of pure cultures of *Chlorella* microalgae used in the study (light microscopy,  $\times 400$  magnification, spherical cells 3–8  $\mu m$  in diameter, bright green coloration)

Культивирование микроводорослей до экспоненциальной фазы роста, используемой в опытах, иллюстрирует рисунок 3, где представлена живая суспензия *Chlorella* в период активного роста, что свидетельствует о её жизнеспособности перед началом биосорбционного эксперимента. Интенсивная зелёная окраска суспензии подтверждает высокую фотосинтетическую активность культуры.



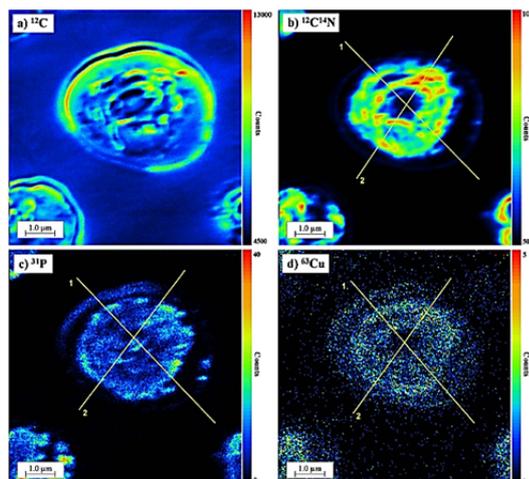
Рисунок 3 – Культура *Chlorella* в экспоненциальной фазе роста (живая суспензия в питательной среде Бристоль, видны плотная зелёная суспензия и активное деление клеток)

Figure 3 – *Chlorella* culture in the exponential growth phase (live suspension in Bristol's medium, showing dense green suspension and active cell division)

Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рисунок 4) наглядно демонстрируют морфологические изменения поверхности клеток *Chlorella* после сорбции ионов меди. При этом микроскопические исследования подтвердили сохранение общей целостности клеточной структуры у адаптированных штаммов, что является ключевым фактором для их долгосрочного и стабильного функционирования в системах биологической очистки.

*Влияние физико-химических факторов на процесс биосорбции.* Комплексное исследование влияния различных параметров показало, что эффективность биосорбции  $Cu(II)$  сильно зависит от начального рН водной среды. Максимальное удаление металла (85–92%) наблюдалось в слабокислой

Рисунок 4 –  
СЭМ-микроснимок клеток *Chlorella*  
до и после биосорбции ионов меди  
Figure 4 –  
SEM micrograph of *Chlorella* cells  
before and after copper ion biosorption



области при начальной рН 5,0–6,0. При более низких рН (2,0–3,0) сорбция значительно снижалась из-за конкуренции между ионами водорода ( $H^+$ ) и ионами меди ( $Cu^{2+}$ ) за активные центры на поверхности биомассы. Это связано с тем, что в сильноокислой среде высокая концентрация ионов  $H^+$  приводит к протонированию функциональных групп (таких, как  $-COOH$ ,  $-OH$ ,  $-NH_2$ ) клеточной стенки микроводорослей. В результате их способность связывать катионы металлов, в частности  $Cu^{2+}$ , существенно уменьшается. При  $pH > 7,0$  происходили образование гидроксидных комплексов меди и ее осаждение, что затрудняло оценку именно биосорбционного процесса и могло приводить к вторичному загрязнению донных отложений.



Рисунок 5 –  
Биомасса *Chlorella* после биосорбции  $Cu^{2+}$   
(характерное потемнение и буро-зелёная окраска  
свидетельствуют о связывании меди)  
Figure 5 –  
*Chlorella* biomass after  $Cu^{2+}$  biosorption  
(characteristic darkening and brownish-green coloration  
indicate copper binding)

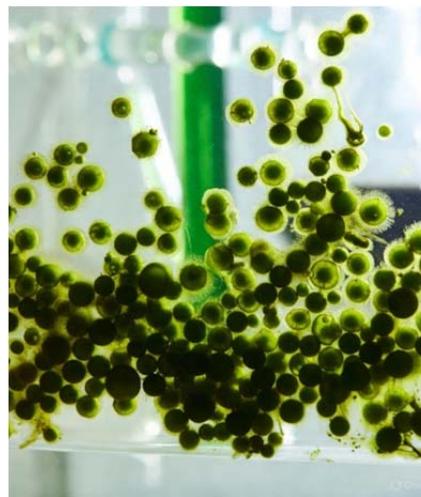


Рисунок 6 –  
Внешний вид биомассы *Chlorella*  
в нативном состоянии  
до проведения биосорбции  
Figure 6 –  
External appearance of *Chlorella* biomass  
in its native state prior  
to biosorption

Результат 4-часового контакта биомассы с ионами меди, выраженный в изменении её окраски, представлен на рисунке 5. На иллюстрации отражён начальный этап взаимодействия клеток *Chlorella* с ионами  $Cu^{2+}$ , который визуалью проявляется в заметном потемнении биомассы. Это свидетельствует об активном протекании процесса сорбции/взаимодействия, в отличие от рисунка 6, где показан исходный вид биомассы.

Оптимальное время достижения равновесия в статических условиях составило 5–7 сут. Наиболее интенсивно процесс протекал в первые 24–48 ч, после чего его скорость замедлялась. Увели-

чение дозы биомассы с 0,5 до 2,0 г/л приводило к росту эффективности сорбции, однако дальнейшее увеличение дозы не давало пропорционального прироста, что связано с эффектом агрегации клеток и уменьшением доступной удельной поверхности, что важно учитывать при проектировании очистных сооружений.

**Кинетика и изотермы биосорбции.** Экспериментальные данные по кинетике наилучшим образом соответствовали модели псевдовторого порядка (коэффициент детерминации  $R^2 > 0,99$ ), что указывает на преобладание хемосорбции как лимитирующей стадии процесса. Это предполагает, что скорость сорбции пропорциональна квадрату числа свободных активных центров на поверхности биосорбента и процесс контролируется химической природой взаимодействия.

Анализ изотерм сорбции показал, что процесс хорошо описывается как моделью Лангмюра, так и моделью Фрейндлиха. Высокие значения коэффициента детерминации для модели Лангмюра ( $R^2 > 0,98$ ) свидетельствуют о мономолекулярном характере сорбции на гомогенной поверхности с ограниченным числом идентичных активных центров. Рассчитанная по модели Лангмюра максимальная сорбционная емкость  $q_{\max}$  для иммобилизованной биомассы *Chlorella vulgaris* составила 45,2 мг/г. Модель Фрейндлиха также показала хорошее соответствие, что может указывать на некоторую гетерогенность поверхности сорбента и многослойный характер сорбции при высоких концентрациях.

Изменения в этих областях свидетельствуют о комплексообразовании и ионном обмене между ионами  $\text{Cu(II)}$  и функциональными группами ( $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{PO}_4^{3-}$ ) полисахаридов, белков и липидов клеточной стенки микроводорослей. Эти данные имеют фундаментальное значение для понимания механизмов самоочищения водных экосистем и целенаправленного конструирования биосорбционных материалов.

*Практическая апробация и разработка технологической схемы для охраны водных ресурсов.* На основе лабораторных исследований была разработана пилотная технологическая схема доочистки сточных вод АГМК, направленная на снижение сброса меди в местные водные объекты. Апробация проводилась на действующих очистных сооружениях комбината в отстойниках-усреднителях общей площадью 2250 м<sup>2</sup> и объемом 1650 м<sup>3</sup> каждый, что моделировало условия реального водного объекта.

В систему было введено 600 кг живой биомассы *Chlorella*, адаптированной к меди. В ходе 7-суточного испытания были достигнуты следующие результаты, имеющие важное прикладное значение для водного хозяйства:

биомасса микроводорослей увеличилась в 3 раза (до 1800 кг), что свидетельствует об их активном росте в сточной воде и возможности создания самоподдерживающейся очистной системы;

концентрация ионов  $\text{Cu(II)}$  в сточной воде была снижена с исходных значений до уровня, не превышающего ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения (0,1 мг/л);

отмечено значительное снижение концентраций ионов натрия и хлоридов, что улучшает общее солевое состояние очищенной воды.

Экологический мониторинг водоема «Кучбулок», куда сбрасывались очищенные сточные воды, не выявил негативных изменений в состоянии гидробионтов, что подтверждает экологическую безопасность предлагаемой технологии для водных экосистем.

Разработанная схема предполагает интеграцию биосорбционного блока с использованием *Chlorella* в существующую цепочку физико-химической очистки, что позволяет создать гибридную, более эффективную и устойчивую систему, способствующую снижению техногенной нагрузки на водные ресурсы региона.

*Экономическое и экологическое обоснование для сферы водного хозяйства.* Использование биосорбции на основе микроводорослей обладает рядом стратегических преимуществ перед традиционными методами в контексте устойчивого управления водными ресурсами:

Экономичность: снижение эксплуатационных затрат на электроэнергию и химические реагенты. Отработанная биомасса, насыщенная металлом, может быть утилизирована с получением ценных продуктов (биоудобрения, сырье для биотоплива), что соответствует принципам циркулярной экономики.

Экологическая безопасность: значительное сокращение или полное отсутствие вторичных токсичных отходов (шламов), которые сами по себе являются источником долговременного загрязнения почв и грунтовых вод. Технология основана на возобновляемом биологическом ресурсе.

Эффективность и соответствие нормативам: обеспечивает глубокую очистку сточных вод до нормативных показателей, установленных для сброса в водные объекты, что способствует улучшению качества водных ресурсов в промышленных регионах.

**Обсуждение.** Полученные результаты позволяют рассмотреть несколько фундаментальных и прикладных аспектов, подтверждающих перспективность применения *Chlorella*, опосредованной биосорбции в системах охраны водных ресурсов.

*Механистические аспекты и эффективность.* Преобладание хемосорбции, описываемой кинетикой псевдотортого порядка, в сочетании с удовлетворительным соответствием изотермы Лангмюра указывает на специфическое и ограниченное по числу центров взаимодействие ионов Cu(II) с функциональными группами клеточной стенки. Это коррелирует с данными спектроскопических исследований, согласно которым карбоксильные и фосфатные группы полисахаридов и пептидогликанов вносят основной вклад в комплексообразование с катионами переходных металлов. Наблюдаемое визуальное потемнение биомассы и морфологические изменения на СЭМ-микроснимках служат прямым свидетельством поверхностной сорбции и возможного внутриклеточного компартментализованного депонирования, что подчеркивает комплексный характер процесса, выходящий за рамки простой физической адсорбции.

*Сравнительные преимущества и технологическая синергия.* Представленная технология позиционируется не как альтернатива, а как эффективный завершающий этап в гибридных схемах очистки. Ее интеграция после физико-химических методов позволяет достичь предельно низких остаточных концентраций металлов, соответствующих жестким рыбохозяйственным нормативам. Ключевое преимущество перед традиционными реагентными методами (осаждение, ионный обмен) заключается в минимизации вторичных отходов. Образующаяся металлизированная биомасса представляет собой концентрированный продукт, пригодный для дальнейшей утилизации (например, в металлургическом цикле или после пиролиза), что соответствует принципам безотходного производства и циркулярной экономики в отличие от токсичных шламов химического осаждения.

*Географический и климатический контекст.* Успешная апробация в условиях Узбекистана демонстрирует адаптивность метода к регионам с высокой инсоляцией и дефицитом водных ресурсов. Высокая фотосинтетическая активность *Chlorella* в субтропическом климате позволяет существенно сократить энергозатраты на аэрацию и поддерживать процесс биоочистки за счет солнечной энергии. Это формирует важное конкурентное преимущество для промышленных центров Центральной Азии, где вопросы энергоэффективности и водосбережения носят стратегический характер. Локальная адаптация штаммов к специфическому составу стоков обеспечивает устойчивость и стабильность биосистемы в условиях реального производства.

*Экономическое и экосистемное обоснование.* Экономический эффект проистекает не только из снижения затрат на реагенты и электроэнергию, но и из потенциальной коммерциализации побочных продуктов. Очищенная вода более высокого качества может быть возвращена в технологический цикл, снижая нагрузку на водозабор, а биомасса с повышенным содержанием микроэлементов рассматривается как сырье для кормовых добавок или биоудобрений. С экосистемной точки зрения метод устраняет риск хронического загрязнения донных отложений растворимыми комплексными соединениями металлов, которые образуются при некоторых химических способах очистки, способствуя долгосрочному восстановлению гидробиоценозов в приемных водоемах.

Таким образом, исследование переводит известный лабораторный феномен биосорбции в практическую плоскость, предлагая инженерно обоснованное решение для снижения антропогенной эвтрофикации водных экосистем тяжелыми металлами. Последующие работы должны быть сфокусированы на оптимизации биореакторов непрерывного действия, изучении мультиметалльных систем и полномасштабном технико-экономическом анализе для различных отраслей промышленности.

**Заключение.** Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность использования штаммов микроводорослей *Chlorella vulgaris* и *Chlorella pyrenoidosa* для биосорбционной очистки сточных вод металлургических производств от ионов меди. Установлены оптимальные параметры процесса и выявлены основные механизмы сорбции, заключающиеся в хемосорбции на функциональные группы клеточной стенки.

Разработанная и апробированная в полупромышленных условиях на АГМК технологическая схема демонстрирует не только техническую реализуемость, но и значительный экологический и

экономический потенциал для решения задач охраны и рационального использования водных ресурсов в промышленно развитых регионах. Предлагаемый биосорбционный метод соответствует принципам «зеленой» экономики и стратегическим направлениям развития Республики Узбекистан в области охраны окружающей среды и водного хозяйства.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию иммобилизации биомассы для использования в проточных системах, изучение синергетического эффекта при очистке многокомпонентных смесей тяжелых металлов, характерных для сточных вод различных отраслей промышленности, и масштабирование технологии для внедрения на других промышленных предприятиях с целью снижения совокупной антропогенной нагрузки на водные объекты.

Исследованная технология энергетически и экономически выгодна для условий Узбекистана, позволяет интегрировать очистку воды с получением кормовой биомассы и соответствует задачам устойчивого развития и циркулярной экономики.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Муминова Р. Н., Казимова Н. М. Проблема очистки сточных вод в Узбекистане // Молодой учёный. – 2015. – № 22(102). – С. 47-48. <https://moluch.ru/archive/102/23372/>
- [2] Abo-Alkasem M. I., Hassan N. H., Abo Eloud M. M. Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals // Bull Natl Res Cent. – 2023. – No. 47. – P. 31. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01006-z>
- [3] Mehta S. K., Gaur J. P. Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: Progress and prospects // Critical Reviews in Biotechnology. – 2005. – No. 25(3). – P. 113–152. <https://doi.org/10.1080/07388550500248571>
- [4] Al-Rub, F. A. A., El-Naas, M. H., Ashour, I., Al-Marzouqi, M. Biosorption of copper on *Chlorella vulgaris* from single, binary and ternary metal aqueous solutions // Process Biochemistry. – 2006. – No. 41(2). – P. 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.07.018>
- [5] Aksu, Z., Dönmez, G. Binary biosorption of cadmium(II) and nickel(II) onto dried *Chlorella vulgaris*: Co-ion effect on mono-component isotherm parameters // Process Biochemistry. – 2006. – No. 41(4). – P. 860-868. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.10.025>
- [6] Турабджанов С. М., Понамарева Т. В., Юсупова Д. А., Назиров З. Ш., Рахимова Л. С. Исследование сорбции ионов меди из сточных вод фосфорнокислым катионитом // Химическая безопасность. – 2018. – № 2(2). – С. 173-182. <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.2.14115>
- [7] Jiang, Q., Chen, H., Fu, Z., Fu, X., Wang, J., Liang, Y., Yin, H., Yang, J., Jiang, J., Yang, X., Wang, H., Liu, Z., Su, R. Current Progress, Challenges and Perspectives in the Microalgal-Bacterial Aerobic Granular Sludge Process: A Review // Int J Environ Res Public Health. – 2022. – No. 19(21). – P. 13950. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113950>
- [8] Oruganti, R. K., Katam, K., Show, P. L., Gadhamshetty, V., Upadhyayula, V. K. K., Bhattacharyya, D. A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal // Bioengineered. – 2022. – No. 13(4). – P. 10412-10453. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2056823>
- [9] Thiruchchelvam, T., Sathasivan, A. Can microalgae-bacteria system started with *Chlorella vulgaris* treat municipal wastewater without mechanical aeration? // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. – 2025. – No. 11. – P. 101236. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101236>
- [10] Chojnacka, K. Using biosorption to enrich the biomass of *Chlorella vulgaris* with microelements to be used as mineral feed supplement // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2007. – No. 23(7). – P. 1139-1147. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9344-9>
- [11] Al-Qunaibit, M. H. Divalent Cu, Cd, and Pb biosorption in mixed solvents // Bioinorganic Chemistry and Applications. – 2009. – P. 561091. <https://doi.org/10.1155/2009/561091>
- [12] Ahmad, A., Bhat, A. H., Buang, A. Biosorption of transition metals by freely suspended and Ca-alginate immobilised with *Chlorella vulgaris*: Kinetic and equilibrium modeling // Journal of Cleaner Production. – 2018. – No. 171. – P. 1361-1375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.069>
- [13] Cheng, J., Yin, W., Chang, Z., Lundholm, N., Jiang, Z. Biosorption capacity and kinetics of cadmium(II) on live and dead *Chlorella vulgaris* // Journal of Applied Phycology. – 2017. – No. 29(1). – P. 211-221. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0916-2>
- [14] Wanta, K. C., Miryanti, A., Kristijarti, A. P. Biosorption of Cu(II) ions using living microalgae *Chlorella* sp.: Effects of microalgae concentration, salinity, and light color // International Journal of Technology. – 2023. – No/ 14(1). – P. 291-319. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i1.4995>
- [15] Edris, G., Alhamed, Y., Alzahrani, A. Biosorption of cadmium and lead from aqueous solutions by *Chlorella vulgaris* biomass: Equilibrium and kinetic study // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2014. – No. 39(1). – P. 87-93. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0820-x>
- [16] Moreira, V. R., Lebron, Y. A. R., Freire, S. J., Santos, L. V. S., Palladino, F., Jacob, R. S. Biosorption of copper ions from aqueous solution using *Chlorella pyrenoidosa*: Optimization, equilibrium and kinetics studies // Microchemical Journal. – 2019. – No. 145. – P. 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.027>
- [17] Mahlangu, D., Mphahlele, K., De Paola, F., Mthombeni, N. H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // Water. – 2024. – No. 16(5). – P. 718. <https://doi.org/10.3390/w16050718>
- [18] Almomani, F., Bhosale, R. R. Bio-sorption of toxic metals from industrial wastewater by algae strains *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*: Application of isotherm, kinetic models and process optimization // Science of The Total Environment. – 2021. – No. 755(2). – P. 142654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142654>

- [19] Kayumova, I. K., Sidicov, S., Egamberdiev, E. A., Turabjanov, S. M. Biosorption of Cu(II) ions from metal plant wastewater using *Chlorella* // *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*. – 2025. – No. 5(6). – P. 2398-2402.
- [20] СанПиН РУз №0211-06. Гигиенические критерии и контроль качества воды централизованных систем хозяйственно-питьевого водоснабжения населения Узбекистана. – Ташкент, 2006.
- [21] Andersen, R. A. (ed.). *Algal Culturing Techniques*. – Burlington: Elsevier Academic Press, 2005.
- [22] UTEX Culture Collection of Algae. Bristol Medium. <https://utex.org/products/bristol-medium> (дата обращения: 10.03.2025).
- [23] Johnson, H. L., Stauber, J. L., Adams, M., Jolley, D. F. Copper and zinc tolerance of two tropical microalgae after copper acclimation // *Environ Toxicol*. – 2007. – No. 22(3). – P. 234-244.
- [24] Mechanism of Biological Transport and Transformation of Copper, Cadmium, and Zinc in Water by *Chlorella* // *Water*. – 2024. – No. 16(13). – P. 1906. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/13/1906>
- [25] Aksu, Z. Absorption and Adsorption of Heavy Metals by Microalgae // *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. – Chichester: Wiley-Blackwell, 2013. – P. 602-622. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch32>
- [26] Volesky, B. *Biosorption of Heavy Metals*. – Boca Raton: CRC Press, 1990.
- [27] Wilde, E. W., Benemann, J. R. *Biosorption of Heavy Metals by Microalgae in Batch and Continuous Systems // Wastewater Treatment with Algae*. – Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. – P. 37-53. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-10863-5\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-10863-5_3)
- [28] Zeraatkar, A. K., Ahmadzadeh, H., Talebi, A. F., Moheimani, N. R., McHenry, M. P. Biosorption: An Interplay between Marine Algae and Potentially Toxic Elements—A Review // *Marine Drugs*. – 2016. – Vol. 14, No. 4. – Art. 65. <https://doi.org/10.3390/md14040065>
- [29] ГОСТ 31870-2012. Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектрометрии. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартинформ, 2013. <https://docs.cntd.ru/document/1200097409>
- [30] ГОСТ Р 54276-2010. Вода. Методы определения меди. – Введ. 2012-07-01. – М.: Стандартинформ, 2011. [https://allgosts.ru/13/060/gost\\_r\\_54276-2010](https://allgosts.ru/13/060/gost_r_54276-2010)
- [31] Standard Operating Procedures for Analytical Methods and Data Collection in Support of Pilot-Scale Cultivation of Microalgae / EnAlgae Consortium. – Swansea: EnAlgae Project, 2015. <https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/1283/WP1A3.01%20EnAlgae%20SOP%20report-v10%20FINAL.pdf>

## REFERENCES

- [1] Muminova, R. N., Kazimova, N. M. The problem of wastewater treatment in Uzbekistan [Problema ochistki stochnykh vod v Uzbekistane] // *Molodoy Ucheny (Young Scientist)*. 2015. No. 22(102). P. 47-48. <https://moluch.ru/archive/102/23372/> (in Russ.)
- [2] Abo-Alkasem, M. I., Hassan, N. H., Abo Elsoud, M. M. Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals // *Bulletin of the National Research Centre*. 2023. No. 47. P. 31. <https://doi.org/10.1186/s42269-023-01006-z>
- [3] Mehta, S. K., Gaur, J. P. Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: Progress and prospects // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2005. No. 25(3). P. 113-152. <https://doi.org/10.1080/07388550500248571>
- [4] Al-Rub, F. A. A., El-Naas, M. H., Ashour, I., Al-Marzouqi, M. Biosorption of copper on *Chlorella vulgaris* from single, binary and ternary metal aqueous solutions // *Process Biochemistry*. 2006. No. 41(2). P. 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.07.018>
- [5] Aksu, Z., Dönmez, G. Binary biosorption of cadmium(II) and nickel(II) onto dried *Chlorella vulgaris*: Co-ion effect on mono-component isotherm parameters // *Process Biochemistry*. 2006. No. 41(4). P. 860-868. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.10.025>
- [6] Turabdzhanov, S. M., Ponomareva, T. V., Yusupova, D. A., Nazirov, Z. Sh., Rakhimova, L. S. Study of copper ion sorption from wastewater using a phosphoric acid cation exchanger [Issledovanie sorbtzii ionov medi iz stochnykh vod fosfornokislym kationitom] // *Khimicheskaya Bezopasnost (Chemical Safety)*. 2018. No. 2(2). P. 173-182. <https://doi.org/10.25514/CHS.2018.2.14115>
- [7] Jiang, Q., Chen, H., Fu, Z., Fu, X., Wang, J., Liang, Y., Yin, H., Yang, J., Jiang, J., Yang, X., Wang, H., Liu, Z., Su, R. Current Progress, Challenges and Perspectives in the Microalgal-Bacterial Aerobic Granular Sludge Process: A Review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. No. 19(21). P. 13950. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113950>
- [8] Oruganti, R. K., Katam, K., Show, P. L., Gadhamshetty, V., Upadhyayula, V. K. K., Bhattacharyya, D. A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal // *Bioengineered*. 2022. No. 13(4). P. 10412-10453. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2056823>
- [9] Thiruchchelvam, T., Sathasivan, A. Can microalgae-bacteria system started with *Chlorella vulgaris* treat municipal wastewater without mechanical aeration? // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025. No. 11. P.101236. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101236>
- [10] Chojnacka, K. Using biosorption to enrich the biomass of *Chlorella vulgaris* with microelements to be used as mineral feed supplement // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2007. No. 23(7). P. 1139-1147. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9344-9>
- [11] Al-Qunaibit, M. H. Divalent Cu, Cd, and Pb biosorption in mixed solvents. *Bioinorganic Chemistry and Applications*. 2009. P. 561091. <https://doi.org/10.1155/2009/561091>
- [12] Ahmad, A., Bhat, A. H., Buang, A. Biosorption of transition metals by freely suspended and Ca-alginate immobilised with *Chlorella vulgaris*: Kinetic and equilibrium modeling // *Journal of Cleaner Production*. 2018. No. 171. P. 1361-1375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.069>

- [13] Cheng, J., Yin, W., Chang, Z., Lundholm, N., Jiang, Z. Biosorption capacity and kinetics of cadmium(II) on live and dead *Chlorella vulgaris* // *Journal of Applied Phycology*. 2017. No. 29(1). P. 211-221. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0916-2>
- [14] Wanta, K. C., Miryanti, A., Kristijarti, A. P. Biosorption of Cu(II) ions using living microalgae *Chlorella* sp.: Effects of microalgae concentration, salinity, and light color // *International Journal of Technology*. 2023. No. 14(1). P. 291-319. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i1.4995>
- [15] Edris, G., Alhamed, Y., Alzahrani, A. Biosorption of cadmium and lead from aqueous solutions by *Chlorella vulgaris* biomass: Equilibrium and kinetic study // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014. No. 39(1). P. 87-93. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0820-x>
- [16] Moreira, V. R., Lebron, Y. A. R., Freire, S. J., Santos, L. V. S., Palladino, F., Jacob, R. S. Biosorption of copper ions from aqueous solution using *Chlorella pyrenoidosa*: Optimization, equilibrium and kinetics studies // *Microchemical Journal*. 2019. No. 145. P. 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.027>
- [17] Mahlangu, D., Mphahlele, K., De Paola, F., Mthombeni, N. H. Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review // *Water*. 2024. No. 16(5). P. 718. <https://doi.org/10.3390/w16050718>
- [18] Almomani, F., Bhosale, R. R. Bio-sorption of toxic metals from industrial wastewater by algae strains *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris*: Application of isotherm, kinetic models and process optimization // *Science of The Total Environment*. 2021. No. 755(2). P. 142654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142654>
- [19] Kayumova, I. K., Sidicov, S., Egamberdiev, E. A., Turabjanov, S. M. Biosorption of Cu(II) ions from metal plant wastewater using *Chlorella* No. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*. 2025. No. 5(6). P. 2398-2402.
- [20] Sanitary Rules and Norms of the Republic of Uzbekistan No. 0211-06. Hygienic criteria and quality control of water in centralized systems of domestic and drinking water supply for the population of Uzbekistan [SanPiN RUz №0211-06]. Tashkent, 2006 (in Russ.).
- [21] Andersen, R. A. (editor). *Algal Culturing Techniques*. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005.
- [22] UTEX Culture Collection of Algae. Bristol Medium. <https://utex.org/products/bristol-medium> (accessed: 10.03.2025).
- [23] Johnson, H. L., Stauber, J. L., Adams, M., Jolley, D. F. Copper and zinc tolerance of two tropical microalgae after copper acclimation // *Environmental Toxicology*. 2007. No. 22(3). P. 234-244.
- [24] Mechanism of Biological Transport and Transformation of Copper, Cadmium, and Zinc in Water by *Chlorella* // *Water*. 2024. No. 16(13). P. 1906. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/13/1906>
- [25] Aksu, Z. Absorption and Adsorption of Heavy Metals by Microalgae. In: *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology*. 2nd edition. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013. P. 602-622. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch32>
- [26] Volesky, B. *Biosorption of Heavy Metals*. Boca Raton: CRC Press, 1990.
- [27] Wilde, E. W., Benemann, J. R. *Biosorption of Heavy Metals by Microalgae in Batch and Continuous Systems*. In: *Wastewater Treatment with Algae*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1998. P. 37-53. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-10863-5\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-10863-5_3)
- [28] Zeraatkar, A. K., Ahmadzadeh, H., Talebi, A. F., Moheimani, N. R., McHenry, M. P. Biosorption: An Interplay between Marine Algae and Potentially Toxic Elements – A Review. *Marine Drugs*. 2016. No. 14(4). P. 65. <https://doi.org/10.3390/md14040065>
- [29] GOST 31870-2012. Drinking water. Determination of elements content by atomic spectrometry methods. Introduced 2013-07-01. Moscow: Standartinform, 2013. <https://docs.cntd.ru/document/1200097409>
- [30] GOST R 54276-2010. Water. Methods for determination of copper. Introduced 2012-07-01. Moscow: Standartinform, 2011. [https://allgosts.ru/13/060/gost\\_r\\_54276-2010](https://allgosts.ru/13/060/gost_r_54276-2010)
- [31] Standard Operating Procedures for Analytical Methods and Data Collection in Support of Pilot-Scale Cultivation of Microalgae / EnAlgae Consortium. Swansea: EnAlgae Project, 2015. <https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/1283/WP1A3.01%20EnAlgae%20SOP%20report-v10%20FINAL.pdf>

**И. К. Каюмова<sup>\*1</sup>, С. М. Турабжанов<sup>2</sup>, Д. Д. Абдурахманов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> \*Докторант (Ташкент мемлекеттік техникалық университеті, Ташкент, Өзбекстан; [kayumova.iroda@inbox.ru](mailto:kayumova.iroda@inbox.ru))

<sup>2</sup> Технология ғылымдарының докторы, профессор, ректор (Ташкент мемлекеттік техникалық университеті, Ташкент, Өзбекстан; [tur\\_sad@mail.ru](mailto:tur_sad@mail.ru))

<sup>3</sup> Қоршаған ортаны қорғау кафедрасының меңгерушісі (Алмалық таукен металлургия комбинаты, Ташкент, Өзбекстан; [d.abdurahmanov@agmk.uz](mailto:d.abdurahmanov@agmk.uz))

## **СУ РЕСУРСТАРЫН ҚОРҒАУ ҮШІН ХЛОРЕЛЛА ТҰҚЫМЫНЫҢ МИКРОБАЛДЫРЛАРЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ БИОСОРБЦИЯНЫ ЗЕРТТЕУ**

**Аннотация.** Су экожүйелеріне, әсіресе өнеркәсіптік аймақтарда антропогендік жүктеменің артуын ескере отырып, ағынды суларды тазартудың тиімді әдістерін әзірлеу суды басқарудың негізгі міндеті болып табылады. Бұл мақалада *Chlorella* тұқымдасының бір жасушалы жасыл микробалдырларының биосорбциялық потенциалын пайдаланып, металлургиялық ағынды сулардан мыс (Cu(II)) иондарын тазартудың экологиялық таза технологиясын әзірлеуге бағытталған зерттеу нәтижелері ұсынылған. Мыстың жоғары

концентрациясына бейімделген *Chlorella vulgaris* және *Chlorella pyrenoidosa* штамдарының төзімділігі мен биосорбциялық қабілеті эксперименталды түрде зерттелді. Орталық Азиядағы ең ірі өнеркәсіптік орталықтардың бірі – Алмалық тау-кен металлургиялық комбинаты (АММК) ААҚ-да биологиялық ағынды суларды тазартудың пилоттық процесінің схемасы әзірленіп, пилоттық жағдайда сәтті сынақтан өткізілді. Металлургия өнеркәсібі дамыған аймақтарда су айдындарына антропогендік жүктемені азайту және су ресурстарының сапасын жақсарту үшін Хлорелла негізіндегі биосорбцияны пайдаланудың экономикалық және экологиялық орындылығы көрсетілген.

**Түйін сөздер:** биосорбция, мыс иондары, ағынды сулар, микробалдырлар, Хлорелла, ауыр металдар, суды тазарту, су ресурстары, ластану географиясы, биоремедиация.

I. K. Kayumova\*<sup>1</sup>, S. M. Turabdzhonov<sup>2</sup>, D. D. Abdurakhmanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> \*PhD student

(Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan; [kayumova.iroda@inbox.ru](mailto:kayumova.iroda@inbox.ru))

<sup>2</sup> D. t. s., Professor, Rector

(Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan; [tur\\_sad@mail.ru](mailto:tur_sad@mail.ru))

<sup>3</sup> Head of the Environmental Protection Department

(JSC "Almalyk Mining and Metallurgical Combine", Tashkent, Uzbekistan; [d.abdurahmanov@agmk.uz](mailto:d.abdurahmanov@agmk.uz))

#### STUDY OF BIOSORPTION USING *CHLORELLA* MICROALGAE FOR THE PROTECTION OF WATER RESOURCES

**Abstract.** Under conditions of increasing anthropogenic pressure on aquatic ecosystems, particularly in industrially developed regions, the development of effective wastewater treatment methods is a key objective for water management. This paper presents the results of a study aimed at developing an environmentally safe technology for the purification of metallurgical wastewater from copper ions (Cu(II)) using the biosorption potential of unicellular green microalgae of the genus *Chlorella*. The tolerance and biosorption capacity of *Chlorella vulgaris* and *Chlorella pyrenoidosa* strains adapted to high copper concentrations were studied experimentally. A pilot technological scheme for the biological polishing of wastewater was developed and successfully tested under pilot-scale conditions at one of the largest industrial hubs in Central Asia – JSC "Almalyk Mining and Metallurgical Combine" (AGMK). The economic and environmental feasibility of applying *Chlorella*-based biosorption for reducing the technogenic load on water bodies and improving water resource quality in regions with developed metallurgical industries is demonstrated.

**Keywords:** biosorption, copper ions, wastewater, microalgae, *Chlorella*, heavy metals, water treatment, water resources, pollution geography, bioremediation.