научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

https://ecopri.ru **https://petrsu.ru**

Издатель
ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

https://ecopri.ru

2026

Главный редактор
А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugołek
В. Н. Якимов
А. В. Сонина

Службы поддержки

Н. А. Марфицина
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции
185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, 33.
E-mail: ecopri@petrsu.ru
https://ecopri.ru

12+

© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

научный электронный журнал ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

https://ecopri.ru **https://petrsu.ru**

УДК 574.64

РАДИОСТИМУЛЯЦИЯ НИЗКИМИ ДОЗАМИ Г-ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЫШАЕТ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АККУМУЛЯЦИИ, СМЯГЧАЕТ СТРЕСС ОТ ИЗБЫТКА МЕДИ У ВОДНОГО РАСТЕНИЯ-ФИТОРЕМЕДИАТОРА РЯСКИ МАЛОЙ (LEMNA MINOR L.)

БОДНАРЬ Ирина Сергеевна	*кандидат биологических наук, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28), bodnar-irina@mail.ru*
ЧЕБАН Евгения Васильевна	*Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28), gesha_lesik@mail.ru*

Ключевые слова: малые дозы ионизирующего излучения, медь, фиторемедиация водоемов, ряска малая.

Аннотация. Ряска малая (Lemna minor L.) является умеренным аккумулятором меди с высоким процентом удаления из загрязненных вод, характеризуется высокой скоростью размножения преимущественно вегетативным путем, что позволяет использовать растения при фиторемедиации загрязненных медью водоемов. Однако эффективность очистки воды может снижаться из-за токсичности меди для ряски. Повышение аккумулирования и устойчивости растений к меди способствовало бы более эффективному удалению ионов из загрязненных вод. В данной работе исследуется возможность радиостимуляции – облучения в малых дозах (7 Гр) – для улучшения показателей роста и аккумулирования меди ряской в условиях избыточного содержания ионов меди (Cu2+) (3, 5, 6 мкмоль/л) в водной среде. Показано, что малые дозы гамма-излучения способствовали повышению устойчивости ряски малой к избытку Cu2+. У облученных растений, выращенных на избытке Cu2+, по сравнению с растениями без облучения снизилась доля повреждений фрондов в виде хлорозов и/или некрозов на 10–24 % ($p \leq 0.05$). Содержание хлорофиллов a+b после радиостимуляции стало выше на 14.5–17.2 % в зависимости от концентрации Cu2+. Стимуляция растений малыми дозами не привела к изменению уровня малонового диальдегида у ряски после воздействия Cu2+ ($p \leq 0.05$). Накопление Cu2+ в сырой массе растений увеличилось на 16.7–19.4 % при сохранении на том же уровне скорости роста и средней площади фрондов ряски. Стимуляцию растений малыми дозами можно применять как способ повышения эффективности фиторемедиации при очистке загрязненных медью сточных промышленных и городских вод.

© Петрозаводский государственный университет

Введение

Медь – тяжелый металл, встречается в пресноводных водоемах в виде простого вещества и ионов Cu^{+} и Cu^{2+} (Varma, Misra, 2018). К источникам загрязнения медью относят добычу руды, отходы металлургических предприятий, промышленность, очистные сооружения, поверхностный сток (от транспорта, зданий и атмосферных осадков), сельское хозяйство и естественные процессы (Izydorczyk et al., 2021; Comber et al., 2022). Вследствие распространенности и опасности загрязнения

гидросферы Cu^{2+} важно разработать недорогие, осуществимые и устойчивые технологии очистки сточных вод (Liu et al., 2023). Технологии удаления меди включают физико-химические методы, а также биологические методы, к которым относят биосорбцию, биоаккумуляцию и биоминерализацию, а также фиторемедиацию (Liu et al., 2023). Фиторемедиация – это эффективная технология очистки окружающей среды от различных органических и неорганических загрязнителей с использованием растений и связанных с ними микробов (Pilon-Smits, 2005). Одними из наиболее распространенных видов-фиторемедиаторов пресных водоемов являются растения семейства рясковые. Ряска малая – эврибионт, встречается повсеместно в пресноводных водоемах северного полушария (Bog et al., 2020). Ряска малая используется в токсикологических исследованиях, для фиторемедиации природных и сточных вод благодаря высокой репродуктивной скорости и способности поглощать различные металлы (Elmacı et al., 2009; Üçüncü et al., 2013). Ряска подходит для фиторемедиации водных экосистем, загрязненных Cu^{2+}, благодаря высоким показателям биоаккумуляции металла, простоте и дешевизне культивирования. Ряска является умеренным аккумулятором меди с высоким процентом (≥ 90 %) удаления из промышленных и муниципальных стоков (Bokhari et al., 2016). Однако, согласно Üçüncü et al., 2013, при фиторемедиации эффективность очистки вод может снижаться из-за высокой токсичности Cu^{2+} для ряски. Повышение аккумулирования и устойчивости растений к Cu^{2+} способствовало бы более эффективному удалению ионов из загрязненных вод.

Результаты экспериментов по комбинированному действию на ряску малую гамма-излучения в средних и больших дозах и Cu^{2+} показали, что накопление Cu^{2+} у предварительно облученных растений усиливается, но после облучения в больших дозах происходит угнетение темпов роста популяции (Bodnar, Cheban, 2022). Гамма-излучение относится к коротковолновым электромагнитным излучениям, которое возникает при радиоактивном распаде определенных элементов и обладает высокой проникающей способностью. Радиация оказывает влияние на морфологические, физиологические, биохимические, генетические и цитологические свойства клеток и тканей, а эффекты зависят от дозы и интенсивности воздействия (Kiani et al., 2022). Повышение толерантности растений к абиотическому стрессу возможно добиться посредством низких доз гамма-излучения (Zhang et al., 2016). Стимулирование стрессоустойчивости посредством малых доз радиации называется радиостимуляцией или радиопрайминг(Villegas et al., 2025). Радиостимуляция малыми дозами используется для повышения урожайности сельскохозяйственных растений, при этом усиливается скорость прорастания семян, ферментативная активность, усвоение питательных веществ, деление и рост клеток, что способствует стойкости к абиотическим и биотическим факторам (Katiyar et al., 2022).

Если для сельскохозяйственных культур важно получить в результате радиостимуляции улучшенную всхожесть семян и повышение урожайности культуры, то для растений-фиторемедиаторов необходимо, чтобы они накапливали большее количество металлов без ущерба для таких важных параметров как скорость роста и биомасса. Предполагаем, что облучение ряски малыми дозами радиации будет способствовать лучшему накоплению металла, не оказывая негативного влияния на рост и развитие растений. Целью данной работы было изучение реакции растений ряски малой на действие гамма-излучения в малых дозах и избыток Cu^{2+}. Возможность использования ионизирующего излучения для повышения эффективности фиторемедиации загрязненных вод не изучена, но есть работы, в которых показано, что низкие дозы повышают устойчивость растений к тяжелым металлам (Wang et al., 2017). Изучение изменения поглощения тяжелых металлов после облучения имеет фундаментальное значение для токсикологии растений, радиоэкологии, на практике может применяться для фиторемедиации загрязненных водоемов, а также для фитодобычи.

Материалы

В работе использовали ряску малую (*Lemna minor* L.) из лабораторной культуры Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Растения выращивали на среде Штейнберга (Steinberg, 1946) в климатической камере Binder с контролем температуры (24 ± 0.1 °C) и режима освещения (16 часов день/8 часов ночь) (OECD, 2006).

Методы

Условия эксперимента

Для эксперимента растения облучили в дозе 7 Гр на установке гамма-излучения с источником Cs^{137} («Исследователь», Россия) с мощностью дозы 0.74 Гр/мин. После облучения растения промыли в дистиллированной воде и перенесли по 12 растений в 5 стеклянных емкостей на вариант воздействия со средой Штейнберга, содержащей Cu^{2+} (3, 5 или 6 мкмоль/л) в виде $CuCl_2$. На среде с Cu^{2+} растения культивировали в течение 7 дней. Рассматриваемые концентрации Cu^{2+} соответствуют реальному загрязнению водных объектов и приводят к угнетению роста ряски малой

(Боднарь и др., 2018). В качестве контроля использовали растения без воздействия, выращенные на среде Штейнберга. У растений определяли удельную скорость роста, среднюю площадь фрондов, долю фрондов с повреждениями. Удельную скорость роста рассчитывали как отношение разности натуральных логарифмов числа фрондов в последние и первые сутки ко времени (OECD, 2006). Повреждение фрондов рассматривали как отношение фрондов с повреждениями (хлорозы, некрозы) к общему числу фрондов. Среднюю площадь фрондов рассчитывали по фотографиям с использованием программы Jmage J (**NIH**, USA).

Анализ содержания Cu^{2+} в растениях определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Для разложения образцов использовалась микроволновая минерализация HNO_3 и H_2O_2. Анализ проводили в Экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Определение хлорофиллов и каротиноидов

Хлорофиллы и каротиноиды определяли через четверо суток после начала эксперимента в спиртовой вытяжке спектрофотометрически при длинах волн 470, 649 и 664 нм и концентрацию рассчитывали по формуле (Lichtenthaler, 1987).

Определение малонового диальдегида (МДА)

Концентрацию МДА у растений определяли через четверо суток после начала эксперимента по методу, основанному на способности МДА реагировать с тиобарбитуровой кислотой в кислой среде при нагревании с образованием окрашенного триметинового комплекса, который можно измерить фотометрически по максимуму поглощения при 532 нм (Молекулярно-генетические и биохимические методы…, 2012).

Статистическая обработка данных

Для анализа накопления Cu^{2+} рассчитывали коэффициент биоконцентрации (КБК), соотношение между содержанием элемента в сырой массе растений и начальным содержанием в среде (Vidakovic-Cifrec et al., 2015). Экспериментальные и контрольные группы сравнивали с использованием критериев Стьюдента и Манна-Уитни. Эксперименты проводили в 3 повторностях. Для оценки связи использовали коэффициент корреляции Пирсона (r). Статистический анализ выполнен с использованием программного пакета Statistica 6.0 (StatSoft, США).

Результаты

Облучение в малых дозах не привело к изменению темпов роста лабораторной культуры ряски малой, скорость роста не отличалась от контрольной ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента). Воздействие Cu^{2+} в концентрациях 3, 5, 6 мкмоль/л способствовало дозозависимому снижению удельной скорости ряски на 30, 43 и 55 % соответственно. Сравнение темпов роста показало, что скорость роста облученных и необлученных растений за 7 дней роста на среде с 3, 5, 6 мкмоль/л Cu^{2+} одинакова ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента).

Облученные растения были насыщенно зеленого цвета, уровень повреждений ряски после 7 Гр не отличался от контрольного и составлял ≤ 2 %. Cu^{2+} в рассматриваемых концентрациях приводила к росту доли повреждений фрондов в популяции (Табл. 1). После однократного воздействия гамма-излучения снизился уровень повреждений фрондов у растений, которые выросли на среде с избытком Cu^{2+} ($p \leq 0.05$, критерий Манна-Уитни). Значимый эффект радиостимуляции наблюдали при низкой концентрации Cu^{2+} (3 мкмоль/л). Уровень повреждений после облучения снизился на 24 % по сравнению с необлученными растениями. Популяции растений после 7 дней культивирования растений на 3 мкмоль/л Cu^{2+} отличались по цвету: ряска без облучения стала желто-зеленой, у облученных растений – светло-зеленой. У облученных растений уровень повреждений при действии 6 мкмоль/л Cu^{2+} снизился на 10 %. а при 5 мкмоль/л – на 14.5 % относительно необлученных растений.

Площадь фрондов после облучения в дозе 7 Гр соответствовала контрольным растениям ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента). У облученных растений и необлученных после недели воздействия Cu^{2+} площадь изменялась одинаково ($p \leq 0.05$).

Таблица 1. Сравнение основных параметров роста у ряски малой

Cu^{2+}, мкмоль/л	Удельная скорость роста, сутки$^{-1}$		Повреждения фрондов, %		Площадь фрондов (S_{end}/S_{start})	
	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением
0	0.3±0.004	0.29±0.003	0.56±0.14	0.55±0.15	0.97±0.023	0.93±0.18
3	0.21±0.005	0.209±0.003	27.5±1.5	20.8±1.3*	0.56±0.025	0.61±0.01
5	0.172±0.006	0.176±0.002	77.2±1.3	63.5±1.9*	0.52±0.019	0.52±0.09
6	0.159±0.003	0.157±0.005	100	79.4±1.7*	0.61±0.026	0.55±0.015

Примечание. * – отличия достоверны по сравнению с необлученными растениями, $p \leq 0.01$, критерий Стьюдента.

Концентрация хлорофиллов снизилась после воздействия Cu^{2+} (Табл. 2). Радистимуляцией удалось повысить уровень хлорофиллов у растений, растущих на избытке Cu^{2+}. У растений после радиостимуляции повысилось содержание хлорофилла *a*, суммы хлорофиллов *a*+*b* в сравнении с необлученными растениями в варианте с 3 мкмоль/л Cu^{2+} на 14.5 и 17.2 % соответственно. Во всех остальных вариантах с избытком Cu^{2+} содержание хлорофиллов у облученных и необлученных растений одинаково ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента). Содержание каротиноидов снизилось при воздействии Cu^{2+} и совпадало у облученных и необлученных растений ($p \leq 0.05$, критерий Стьюдента).

Таблица 2. Содержание хлорофиллов и каротиноидов

Cu^{2+}, мкмоль/л	Хлорофилл *a*, мг/г сырого веса		Хлорофилл *b*, мг/г сырого веса		Хлорофилл *a*+*b*, мг/г сырого веса		Каротиноиды, мг/г сырого веса	
	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением	Без облучения	С облучением
0	0.85±0.02	0.89±0.02	0.33±0.03	0.39±0.02	1.16±0.04	1.28±0.04	0.22±0.01	0.20±0.01
3	0.62±0.04	0.71±0.02*	0.31±0.02	0.35±0.02	0.93±0.05	1.09±0.04*	0.16±0.01	0.17±0.00
5	0.57±0.05	0.58±0.02	0.32±0.04	0.32±0.01	0.89±0.09	0.93±0.02	0.15±0.01	0.16±0.01
6	0.53±0.03	0.58±0.02	0.29±0.02	0.34±0.02	0.81±0.05	0.91±0.03	0.15±0.01	0.16±0.01

Примечание. * – отличия достоверны по сравнению с необлученными растениями, $p \leq 0.01$, критерий Стьюдента.

При действии Cu^{2+} повышается содержание МДА, который является продуктом перекисного окисления липидов клеточных мембран, вследствие развития окислительного стресса (Табл. 3). После облучения в дозе 7 Гр содержание МДА у растений соответствовало контрольному уровню. Cu^{2+} способствовала повышению уровня МДА ($p \leq 0.05$). Стимуляция растений малыми дозами не привела к снижению уровня МДА у ряски после воздействия Cu^{2+}.

Таблица 3. Концентрация малонового диальдегида

Cu^{2+}, мкмоль/л	МДА, нмоль/г сырой массы	
	Без облучения	С облучением
0	9.4±1.4	10.1±1.8
3	19.5±1.1	18.7±1.5
5	47.7±1.6	45.56±1.7
6	56.75±1.6	52.4±1.7

Радиостимуляция способствовала большему накоплению Cu^{2+} в растениях по сравнению с растениями без облучения (Табл. 4). Наиболее эффективно накапливали Cu^{2+} облученные растения при 6 мкмоль/л Cu^{2+}, наименее – при 3 мкмоль/л. КБК (коэффициент биоконцентрации) Cu^{2+} увеличился у облученных растений на 16.8 % с 208 до 243 после культивирования при 6 мкмоль/л Cu^{2+}, при концентрации меди 3 мкмоль/л Cu^{2+} – на 19.4 % с 134 до 160.

Таблица 4. Содержание Cu^{2+} в растениях

Cu^{2+} в среде, мкмоль/л	Содержание Cu^{2+} в растениях, мг/кг сырой массы (коэффициент биоконцентрации)	
	Без облучения	С облучением
3 (0.201 мг/л)	26.8±1 (134)	32±1.8 (160)*
5 (0.32 мг/л)	66.25±9.2 (207)	66.3±5 (207.2)
6 (0.403 мг/л)	84±4.1 (208)	98±5.9 (243)

Примечание. * – отличия достоверны по сравнению с необлученными растениями, $p \leq 0.05$, критерий Манна –Уитни.

Обсуждение

Повышение эффективности фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами водоемов с помощью ряски малой является актуальным направлением в биотехнологии и водной экотоксикологии. При использовании ряски в очистке сточных вод есть ограничения. Высокое накопление Cu^{2+} в биомассе вызывает токсичность, что внешне проявляется пожелтением фрондов (хлорозами) и приводит к снижению эффективности удаления Cu^{2+} (Al-Baldawi et al., 2022). Как было уже показано ранее (Боднарь и др., 2018) и подтверждено в данной работе, воздействие Cu^{2+} (3–6 мкмоль/л) привело к снижению удельной скорость роста популяции ряски, повышению уровня повреждений в виде хлорозов и/или некрозов фрондов в сравнении с контрольными растениями без обработки, уменьшению средней площади фрондов. Cu^{2+} относится к тяжелым металлам, но в физиологических количествах является необходимым для роста и развития растений элементом, так как входит в состав пластоцианина и цитохромоксидазы, ключевых белков для фотосинтеза и дыхания, необходимых для усвоения углерода и генерации АТФ (Singh et al. 2020; Raj et al., 2020; Singh et al., 2022). Cu^{2+} при избыточном поступлении оказывает отрицательное воздействие на растения, приводит снижению роста, всхожести и прорастания семян, уменьшению размеров листьев, хлорозам, подавляет фотосинтез и провоцирует развитие окислительного стресса у растений (Mir et al., 2021). В загрязнённых средах Cu^{2+} может вызывать нарушение поступления питательных веществ, физиологические, морфологические и биохимические изменения (Adrees et al., 2015). Cu^{2+} воздействует на фотосистему II (ФСII), снижает содержание фотосинтетических пигментов и разрушает тилакоидные мембраны (Miras-Moreno et al., 2022).

Для улучшения эффективности аккумулирования и одновременно повышения устойчивости растений к Cu^{2+} использовали однократное облучение в дозе 7 Гр. Низкие дозы гамма-излучения оказывают стимулирующее действие на растения, в отличие от высоких доз, вызывающих ингибирование роста (Villegas et al. 2023). Анализ зависимости доза-эффект показал, что угнетение скорости роста начинается от 11–18 Гр, поэтому 7 Гр можно отнести к малым дозам для ряски (Боднарь и др., 2016). В данном исследовании это подтвердилось, так как облучение в дозе 7 Гр не вызвало изменение скорости роста, снижение площади фрондов, отличного от контроля увеличения частоты появления некрозов и хлорозов ($p \leq 0.05$).

Предоблучение растений в дозе 7 Гр перед воздействием не способствовало повышению токсичности Cu^{2+} для ряски. Радиостимуляция, основанная на концепции гормезиса, предполагает, что низкие дозы стрессора вызывают полезные адаптивные реакции, повышая устойчивость растений к последующим, более интенсивным стрессорам (Villegas et al., 2023). В качестве положительного эффекта воздействия радиации в данном эксперимента можно рассматривать снижение повреждений фрондов от воздействия Cu^{2+} на 10–24 %, поэтому облучение в дозе 7 Гр можно считать стимулирующим. У растений явление радиационного гормезиса проявляется в виде усиления роста, ускоренного развития, повышения устойчивости к стрессорам или накопления интересующих соединений в ответ на облучение в низких дозах (Volkova et al., 2022). Воздействие радиации в малых дозах вызывает множественные модификации физиологических и биохимических процессов в растениях, например, антиоксидантной ферментативной активности, веществ осмотической регуляции, сигнальных путей передачи и вторичных метаболитов, которые помогают растениям быстрее и эффективнее реагировать на повторяющийся стресс или передавать эту возможную защитную меру следующему поколению (Li et al., 2018; Zhang et al., 2023).

Увеличение уровня повреждений фрондов при воздействии Cu^{2+} связано со снижением содержания хлорофиллов ($r = -0.9$ $p \leq 0.005$). Ингибирующее воздействие на рост вызвано влиянием Cu^{2+} на процесс фотосинтеза, а именно снижением транспорта электронов к фотосистеме I, при этом большая часть поглощенной энергии рассеивается в виде тепла из-за увеличения количества неактивных реакционных центров (Sigh et al., 2022). Предоблучение способствовало снижению уровня повреждений фрондов при 3 мкмоль/л Cu^{2+}, что согласуется с результатами по увеличению содержания хлорофиллов *a*+*b*. На ряске малой было показано, что низкие дозы хронического γ-облучения (27–1500 мГр/ч) повышают экспрессию генов, отвечающих за усиление фотосинтеза у *Lemna minor* (Van Hoeck et al., 2017).

Ряска малая способна аккумулировать Cu^{2+} из водной среды, что подтверждено исследованиями, проводимыми в естественных условиях (Panfili et al., 2017). Благодаря способности к аккумуляции, быстрому росту, неприхотливости к условиям данный вид используется в фиторемедиации природных и сточных вод с высоким содержанием Cu^{2+} (Konakci, 2024). Для повышения аккумулирования меди и смягчении фитотоксического действия меди экспериментально исследованы различные варианты предварительной обработки растений, в том числе физические факторы, например, воздействие электромагнитного излучения, а также биопрепараты (Арефьева и др, 2021; Miras-Morena et al., 2022). В данной работе анализ накопления Cu^{2+} в сырой массе растений показал, что после облучения имеется тенденция к повышению эффективности биоаккумуляции Cu^{2+} при сохранении ростовых характеристик популяции. Большему накоплению Cu^{2+} растений

после радиостимуляции может способствовать снижение доли фрондов с хлорозами/или некрозами. Эффективность накопления Cu^{2+} ряской повысилась на 19.4 % при 3 мкмоль/л Cu^{2+}, 16.7 % – при 6 мкмоль/л Cu^{2+}.

Заключение

Облучение в малых дозах (7 Гр) не ухудшило характеристик роста популяции ряски, более того, можно отметить такие признаки смягчение фитостресса от избытка Cu^{2+} у растений, как снижение доли растений с поврежденными фрондами. Радиостимуляция способствовала увеличению накопления Cu^{2+} в растениях, выращенных на среде с избытком Cu^{2+}. Использование при фиторемедиации облученной в малых дозах ряски малой можно рекомендовать для повышения эффективности очищения загрязненных Cu^{2+} сточных и природных вод.

Библиография

Арефьева О. А., Ольшанская Л. Н., Валиев Р. Ш. Изучение эффективности очистки водных сред ряской малой *Lemna minor* L. от солей тяжелых металлов с использованием энергии электромагнитных излучений и регенерации фиторемедианта // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 2. С. 84–97. https://doi.org/10.21685/2307-9150-2021-2-8.

Боднарь И. С., Чебан Е. В., Зайнуллин В. Г. Особенности воздействия ионов меди и стронция на ряску малую (*Lemna minor* L.) // Принципы экологии. 2018. № 2. С. 4–18. https://doi.org/10.15393/j1.art.2018.7402.

Боднарь И. С., Юшкова Е. А., Зайнуллин В. Г. Влияние γ-излучения на морфометрические характеристики ряски малой (*Lemna minor* L.) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 6. С. 617–622. https://doi.org/10.7868/S0869803116060035.

Молекулярно-генетические и биохимические методы в современной биологии растений / под ред. Вл.В. Кузнецова, В.В. Кузнецова, Г.А. Романова. – Москва, 2012. – 487 с.

Adrees M., Ali S., Rizwan M., Ibrahim M., Abbas F., Farid M., Zia-ur-Rehman M., Irshad M. K., Bharwana S. A. The Effect of Excess Copper on Growth and Physiology of Important Food Crops: A Review // Environ. Sci. Pollut. Res. 2015. V. 22. P. 8148–8162. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4496-5.

Al-Baldawi I. A., Yasin S. R., Jasim S. S., Abdullah S. R. S., Almansoory A. F., Ismail N. 'I. Removal of copper by *Azolla filiculoides* and *Lemna minor*: phytoremediation potential, adsorption kinetics and isotherms // Heliyon. 2022. V. 8. N. 11. P. e11456. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11456.

Bodnar I. S., Cheban E. V. Combined action of gamma radiation and exposure to copper ions on *Lemna minor* L // International Journal of Radiation Biology. 2022. V. 98. N. 6. P. 1120–1129. https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1894655.

Bog M., Sree K. S., Fuchs J., Hoang P. T., Schubert I., Kuever J., Rabenstein A., Paolacci S., Jansen M. A. K., Appenroth K.-J. A taxonomic revision of *Lemna* sect. Uninerves (Lemnaceae) // Taxon. 2020. V. 69. N. 1. P. 56–66. https://doi.org/10.1002/tax.12188.

Bokhari S. H., Ahmad I., Mahmood-Ul-Hassan M., Mohammad A. Phytoremediation Potential of *Lemna minor* L. for Heavy Metals // Int. J. Phytoremediation. 2016. V. 18. P. 25–32. https://doi.org/10.1080/15226514.1058331.

Comber S., Deviller G., Wilson I., Peters A., Merrington G., Borrelli P., Baken S. Sources of copper into the European aquatic environment // Integrated Environmental Assessment and Management. 2022. V. 19. N. 4. P. 1031–1047. https://doi.org/10.1002/ieam.4700.

Elmacı A, Özengin N, Yonar T. Removal of chromium (III), copper (II), lead (II) and zinc (II) using *Lemna minor* L // Fresen Environ Bull. 2009. V. 18. N. 5. P. 538–542.

Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka, K. Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management // Environmental Research. 2021. V. 197. P. 111050. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050.

Katiyar P., Pandey N., Keshavkant S. Gamma radiation: A potential tool for abiotic stress mitigation and management of agroecosystem // Plant Stress. 2022. V. 5. P. 100089. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100089.

Kiani D., Borzouei A., Ramezanpour S., Soltanloo H., Saadati S. Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents // Scientific Reports. 2022. V. 12. N. 1. P. 11082. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14949-6.

Konakci N. Accumulation Assessment of Mo^{4+}, Pb^{++}, and Cu^{++} in the Acidic Water of Copper Mines with *Lemna minor* and *Lemna gibba* // Water. 2024. V. 16. N. 7. P. 975. https://doi.org/10.3390/w16070975

Li X. N., Brestic M., Tan D. X., Zivcak M., Zhu X. C., Liu S. Q., Song F. B., Reiter R. J., Liu F. L. Melatonin alleviates low PS I-limited carbon assimilation under elevated CO_2 and enhances the cold tolerance of offspring in chlorophyll b-deficient mutant wheat // J. Pineal Res. 2018. V. 64. N. 1. e12453. https://doi.org/10.1111/jpi.12453.

Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids; pigments of photosynthetic biomembranes // Method Enzymology. 1987. V. 148. P. 350–382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1.

Liu Y., Wang H., Cui Y., Chen N. Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2023. V. 20. N. 5. P. 3885. https://doi.org/10.3390/ijerph20053885.

Mir A. R., Pichtel J., Hayat S. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil // Biometals. 2021. V. 34. N. 4. P. 737–759. https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z.

Miras-Moreno B., Senizza B., Regni L., Tolisano C., Proietti P., Trevisan M., Lucini L., Rouphael Y., Buono, D. D. Biochemical Insights into the Ability of *Lemna minor* L. Extract to Counteract Copper Toxicity in Maize // Plants. 2022. V. 11. N. 19. P. 1–15. https://doi.org/10.3390/plants11192613.

OECD Guidelines for the testing chemicals. *Lemna* sp. Growth Inhibition Test. Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, 2006. https://doi.org/10.1787/9789264016194-en.

Panfili I., Bartucca M. L., Ballerini E., Del Buono D. Combination of aquatic species and safeners improves the remediation of copper polluted water // Science of The Total Environment. 2017. V. 601–602. P. 1263–1270. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.003

Pilon-Smits E. Phytoremediation // Annu Rev Plant Biol. 2005. V. 56. P. 15–39. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214.

Raj S., Singh H., Trivedi R., Soni V. Biogenic synthesis of AgNPs employing Terminalia arjuna leaf extract and its efficacy towards catalytic degradation of organic dyes // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 9616. https://doi.org/10.1038/s41598-020-66851-8.

Singh H., Kumar D., Soni V. Copper and mercury induced oxidative stresses and antioxidant responses o f *Spirodela polyrhiza* (L.) // Schleid. Biochem. Biophys. Rep. 2020. V. 23. P. 100781. https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100781.

Singh H., Kumar D., Soni V. Performance of chlorophyll a fluorescence parameters in *Lemna minor* under heavy metal stress induced by various concentration of copper // Sci Rep. 2022. V. 12. N. 1. P. 10620. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14985-2.

Steinberg R. A. Mineral requirement of *Lemna minor* // Plant Physiology. 1946. V. 21. P. 42–48. https://doi.org/10.1104/pp.21.1.42.

Üçüncü E., Tunca E., Fikirdeşici Ş., Özkan A. D., Altındağ A. Phytoremediation of Cu, Cr and Pb Mixtures by *Lemna minor* // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2013. V. 91. N. 5. P. 600–604. https://doi.org/10.1007/s00128-013-1107-3.

Van Hoeck A., Horemans N., Nauts R., Van Hees M., Vandenhove H., Blust R. *Lemna minor* plants chronically exposed to ionising radiation: RNA-seq analysis indicates a dose rate dependent shift from acclimation to survival strategies // Plant Sci. 2017. V. 257. P. 84–95. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.01.010.

Varma V. G., Misra A. K. Copper contaminated wastewater – An evaluation of bioremedial options // Indoor and Built Environment. 2018. V. 27. N. 1. P. 84–95. https://doi.org/10.1177/1420326x16669397.

Vidaković-Cifrek Ž., Tkalec M., Šikić S., Tolić S., Lepeduš H., Pevalek-Kozlina B. Growth and photosynthetic responses of *Lemna minor* L. exposed to cadmium in combination with zinc or copper // Arhiv za higijenu rada i toksikologiju. 2015. V. 66. N. 2. P. 141–152. https://doi.org/10.1515/aiht-2015-66-2618.

Villegas D., Sepúlveda C., Ly D. Use of Low-dose Gamma Radiation to Promote the Germination and Early Development in Seeds / Edited by: E. Yıldırım, S. Ermiş, E. Özden // Seed Biology - New Advances. 2023. P. 1–21. https://doi.org/10.5772/intechopen.1003137.

Villegas D., Sepúlveda-Hernández C., Salamé M. J., Poupin M. J. Enhancing growth and salinity stress tolerance in *Arabidopsis* with low-dose gamma radiation priming through a hormesis approach // Plant Stress. 2025. V. 16. P. 100834. https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100834.

Volkova P. Y., Bondarenko E. V., Kazakova E. A. Radiation hormesis in plants // Current Opinion in Toxicology. 2022. V. 30. P. 100334. https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.007.

Wang X., Ma R., Cui D., Cao Q., Shan Z., Jiao Z. Physio-biochemical and molecular mechanism underlying the enhanced heavy metal tolerance in highland barley seedlings pre-treated with low-dose gamma irradiation // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 14233. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14601-8.

Zhang L., Zheng F., Qi W., Wang T., Ma L., Qiu Z., Li J. Irradiation with low-dose gamma ray enhances tolerance to heat stress in *Arabidopsis* seedlings // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016. V. 128. P. 181–188. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.02.025.

Zhang P., Yang H., Liu F., Li X. Stress Memories for Better Tolerance in Plants—A Potential Strategy for Crop Breeding // Agronomy. 2023. V. 13. P. 2105. https://doi.org/10.3390/agronomy13082105.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Формирование ответных реакций на действие малых доз ионизирующего излучения и механизмы трансформации форм нахождения радионуклидов в биосистемах (№ 125020501526-3)».

RADIOSTIMULATION WITH LOW DOSES OF Γ-RADIATION INCREASES THE EFFICIENCY OF ACCUMULATION AND ALLEVIATES STRESS FROM EXCESS COPPER IN THE AQUATIC PLANT-PHYTOREMEDIATOR LEMNA MINOR L.

BODNAR Irina Sergeevna
PhD, Institute of Biology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russia), bodnar-irina@mail.ru

CHEBAN Evgenia Vasilevna
Institute of Biology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (28 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Komi Republic, Russia), gesha_lesik@mail.ru

Keywords: low doses of ionizing radiation, copper, phytoremediation of water bodies, duckweed.

Summary: Due to the prevalence and severity of copper pollution in the hydrosphere, it is important to develop affordable, feasible, and sustainable wastewater treatment technologies (Liu et al., 2023). Phytoremediation is an effective technology for environmental remediation of various organic and inorganic pollutants using plants and associated microbes (Pilon-Smits, 2005). Duckweed is suitable for phytoremediation of copper-contaminated aquatic ecosystems due to its high bioaccumulation rates and ease of cultivation. Duckweed is a moderate copper accumulator with a high percentage (≥ 90 %) of removal from wastewater (Bokhary et al., 2016). However, the effectiveness of phytoremediation may be reduced by copper's high toxicity to duckweed (Ucuncu et al., 2013). Plant tolerance to abiotic stress can be increased using low doses of gamma radiation (Zhang et al., 2016). Stimulating stress resistance with low doses of radiation is called radiostimulation or radiopriming (Villegas et al., 2025). We hypothesized that irradiating duckweed with low doses of radiation would promote metal accumulation without adversely affecting plant growth and development. The use of ionizing radiation to enhance the effectiveness of polluted water phytoremediation has not been studied, but some studies have shown that low doses increase plant tolerance to heavy metals (Wang et al., 2017). Studying changes in heavy metal absorption after irradiation is of fundamental importance for plant toxicology and radioecology and can be applied in practice to the phytoremediation of polluted water bodies. A duckweed culture was grown on Steinberg's medium (Steinberg, 1946) in a climate chamber with controlled temperature (24 ± 0.1 °C) and lighting (16 hours day/8 hours dark) (OECD, 2006). For the experiment, the plants were irradiated with 7 Gy using a gamma-irradiation system with a Cs137 source at a dose rate of 0.74 Gy/min. After irradiation, the plants were rinsed in distilled water, and 12 plants were transferred to five glass containers for each treatment with Steinberg's medium containing Cu2+ (3, 5, or 6 µmol/L) as CuCl2. The experiments were repeated three times. Pre-irradiation of plants with 7 Gy before exposure did not increase Cu2+ toxicity to duckweed. After irradiation, the

growth rate and frond area remained at the same level as non-irradiated plants grown only in excess Cu2+ ($p \leq 0.05$). A 10–24% reduction in frond damage from Cu2+ exposure can be considered a positive effect of radiation exposure in this experiment; therefore, irradiation at a dose of 7 Gy can be considered stimulating. An increase in the level of frond damage under Cu2+ exposure is associated with a decrease in chlorophyll content ($r=-0.9$, $p \leq 0.005$). In plants exposed to radiostimulation, the content of chlorophyll a and the sum of chlorophylls a+b increased by 14.5 % and 17.2 %, respectively, compared to non-irradiated plants in the variant with 3 µmol/L Cu2+. Radiostimulation contributed to a greater accumulation of Cu2+ in plants compared to unirradiated plants. Irradiated plants accumulated Cu2+ most effectively at 6 µmol/L Cu2+, and the least effectively at 3 µ mol/L. The accumulation efficiency increased by 19.4 % at 3µmol/L Cu2+ and 16.7 % at 6 µmol/L Cu2+. The greater accumulation of Cu2+ in plants after radiostimulation may be due to a decrease in the proportion of fronds with chlorosis and/or necrosis. Thus, low-dose irradiation (7 Gy) did not impair the growth characteristics of duckweed, but rather increased Cu2+ accumulation in plants. The use of low-dose irradiated duckweed in phytoremediation can be used to improve the efficiency of copper-contaminated wastewater and natural water treatment.