УДК 502.572 : 504.05 DOI: 10.5281/ZENODO.20799780 EDN: CHGIPY

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ МЕДИ НА РОСТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ДЕКОРАТИВНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ

© 2026. ***О. В. Фрунзе, А. С. Гриб***

Исследовали морфометрические показатели и накопление биомассы проростками *Ageratum houstonianum* Mill. и *Calendulae officinalis* L. в условиях загрязнения среды произрастания ионами меди при различных уровнях концентрации, с оценкой влияния токсиканта на рост вегетативных органов и накопление биомассы, а также выявлением видов устойчивых к медному стрессу.

Ключевые слова: ростовые процессы, тяжёлые металлы, медь.

Введение. Медь является одним из самых распространённых металлов в природе. Человечеству она известна уже более десяти тысяч лет и использовалась разными народами: египтяне, греки, римляне, ацтеки, и китайские культуры [1]. На сегодняшний день медь находит применение в промышленности, энергетике, транспорте, сельском хозяйстве, а также электронике. Более 90 % запасов тяжелого металла сосредоточено в сульфидных рудах, а её содержание в земной коре составляет приблизительно 0,0028 % [2].

Основными источниками загрязнения почв медью являются промышленная деятельность, транспорт, сельское хозяйство (применение удобрений и пестицидов, содержащих медь), сточные воды и атмосферные выбросы [3]. Растения поглощают медь преимущество в форме ионов Cu^{2+} , которые накапливаются в корневой системе. Поглощение и транспорт меди регулируется специализированными белками-переносчиками (CTR/COPT, ZIP, NRAMP, HMA), обеспечивающими её поступление, распределение и включение в метаболизм [4–7].

Фитодоступность меди определяется физико-химическими свойствами почвы, в первую очередь, pH и содержанием органического вещества: при низком pH доступность меди возрастает, тогда как органические соединения способны её связывать и снижать подвижность [8]. В поддержании клеточного гомеостаза меди важную роль играют восстановительный глутатион и металлошапероны, которые участвуют в детоксикации и внутриклеточном транспорте ионов [4; 9].

Для растений в умеренных концентрациях медь (Cu) является одним из важных микроэлементов, наряду с Fe, Mn, Zn. Однако, избыток меди токсичен для растительного организма и может привести к нарушению метаболизма, фотосинтетических процессов, а также замедлению ростовых показателей [4; 8]. Избыток меди нарушает избирательное поглощение ионов, угнетает фотосинтез и дыхание, индуцирует окислительный стресс за счёт образования активных форм кислорода, что приводит к повреждению клеточных мембран белков и ДНК. В морфологическом плане это проявляется хлорозом, некрозом, угнетением роста корней и побегов, а также снижением биомассы растений [5; 10].

Ионы меди поступают в растения преимущественно в двухвалентной форме (Cu^{2+}), однако перед поглощением они подвергаются восстановлению до одновалентной формы (Cu^{+}). Данный этап является необходимым условием для их транспорта через клеточные мембраны и дальнейшего включения в метаболические процессы. Восстановление Cu^{2+} до Cu^{+} осуществляется с участием специфических ферментов – медных редуктаз [11; 12].

Актуальность работы связана с растущим техногенным загрязнением почв Донецкой Народной Республики тяжелыми металлами, особенно в результате военных действий за последние десять лет, и потребностью в поиске недорогих, экологически безопасных способов очистки, среди которых особое место занимает технология фиторемедиации, целью которой является подбор видов растений, устойчивых к металлопрессингу и обладающих высокой способностью к накоплению биомассы. К основным механизмам фиторемедиации относятся фитоэкстракция, фитостабилизация и ризофильтрация. Эффективность этих процессов оценивается по показателям толерантности и биоконцентрации. Известно, что более 400 видов растений обладают способностью к накоплению тяжёлых металлов, но лишь ограниченное число видов около 10–15 разновидностей способно аккумулировать Cu в концентрациях свыше 1000 мг/кг сухой массы [13], что определяет необходимость поиска и изучения устойчивых видов растений, которые были бы перспективными для применения в технологиях очистки загрязнённых почв.

Целью работы являлось изучение изменения морфометрических показателей и биомассы проростков *Ageratum houstonianum* Mill. и *Calendulae officinalis* L. в условиях контролируемого загрязнения почвы ионами меди.

Материал и методика исследования. В качестве объектов исследований при проведении эксперимента были использованы декоративные травянистые растения: *Ageratum houstonianum* Mill. и *Calendulae officinalis* L. Исследования влияния ионов меди на растения проводилось по схеме однофакторного пятиуровневого эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Схема эксперимента влияния загрязнения почвы ионами меди
на некоторые виды декоративных травянистых растений

Вариант загрязнения	Концентрации загрязнителя
	$CuSO_4$, мг/кг (в перерасчете на Cu^{2+})
1	0 (контроль)
2	0,5 ПДК
3	1 ПДК
4	1,5 ПДК
5	2 ПДК

В качестве поллютанта применяли сульфат меди в стехиометрическом соотношении. Уровни концентрации составляли 0 (контроль), 0,5 ПДК, 1 ПДК, 1,5 ПДК, 2 ПДК. Выращивание продолжалось в течение 30 дней в условиях 14-часового светового дня, при температуре 20–22 °C.

В каждый контейнер помещалось 350 г почвы, просеянной через сито с ячейками 3 мм, в которую предварительно вносился сульфат меди «сухим» способом согласно схеме эксперимента.

По завершению эксперимента измерялась длина надземной части и корней проростков.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью специального программного обеспечения по методу Даннета [14].

Анализ результатов. Исследования показали, что реакция различных видов растений на загрязнение почвы ионами меди неоднозначна. При низких концентрациях в почве ионы меди не оказывают токсичного воздействия на биоту почвы и растения, тогда как при высоких концентрациях металла проявляется его токсический эффект.

Влияние меди на рост корней проростков значительно различалось между изучаемыми видами. Для *Ageratum houstonianum* Mill. при внесении меди в концентрации 0,5 ПДК наблюдалось увеличение длины корня на 22 % по сравнению с контролем (рис. 1).

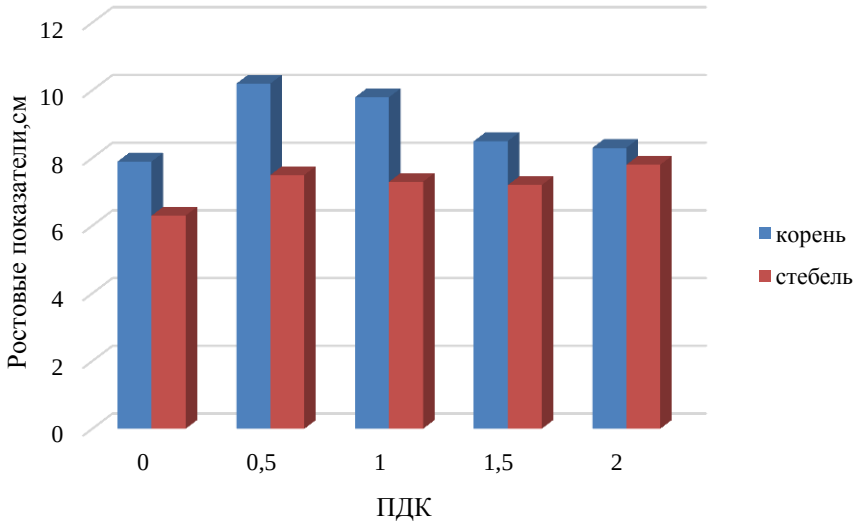


Рис. 1. Влияние загрязнения почвы ионами меди на ростовые показатели проростков *Ageratum houstonianum* Mill.

При концентрации 1 ПДК длина корня увеличивалась на 24 %, а при дальнейшем повышении концентрации до 1,5–2 ПДК рост корня превышал контрольный показатель на 7–8 %, что свидетельствует о стимулирующем действии меди на корневую систему данного вида при умеренных концентрациях и лишь незначительном снижении ростовых показателей при высоких концентрациях.

В свою очередь, у *Calendula officinalis* L. даже при самой низкой концентрации поллютанта 0,5 ПДК наблюдалось уменьшение длины корней на 6 % относительно контроля (рис. 2).

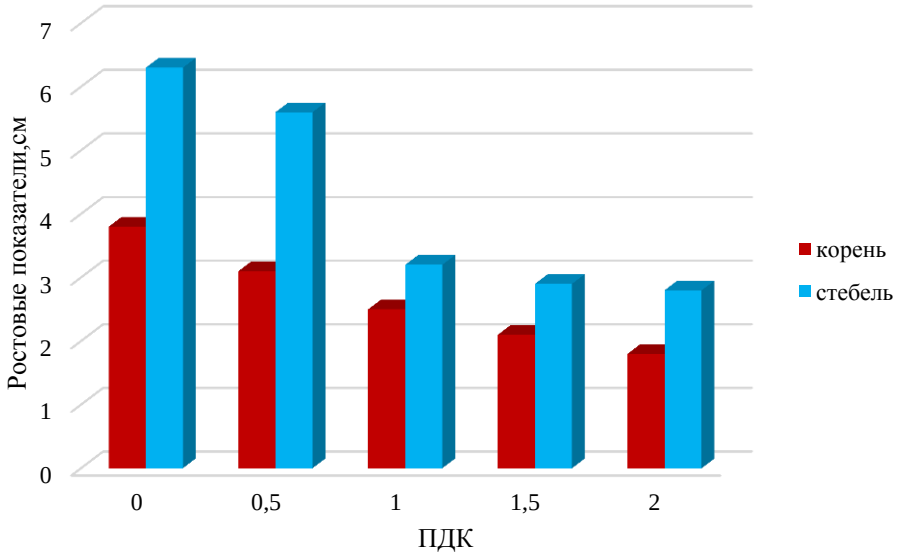


Рис. 2. Влияние загрязнения почвы ионами меди на ростовые показатели проростков *Calendulae officinalis* L.

При 1 ПДК уменьшилась практически в два раза, а при 1,5–2 ПДК – практически в три раза, что сопровождалось фиксацией визуальных признаков угнетения роста (рис. 3).



Рис. 3. Реакция ответа проростков *Calendulae officinalis* L.
на избыток в почве ионов меди

Полученные данные свидетельствует о том, что корневая система *Calendula officinalis* L. проявляет высокую чувствительность даже к умеренным концентрациям меди.

Изменение длины стебля у исследуемых видов имеет значительные различия. У *Ageratum houstonianum* Mill при 0,5 ПДК длина стебля увеличилась на 19 % относительно контрольных показателей, при 1–1,5 ПДК – на 14–15%, а при 2 ПДК – на 24 %. Во всех исследуемых вариантах загрязнения прослеживалось тенденция к стимулирующему воздействию меди на надземную часть проростков, что показывает на определённую устойчивость данного вида к токсиканту.

У *Calendulae officinalis* L. наблюдалась обратная тенденция. Уже при 0,5 ПДК длина стебля снижалась на 7 %, при 1 ПДК – на 29 %, а при 1,5–2 ПДК – на 25–38 % (рис. 2). Визуально угнетение проявлялось в замедлении роста, уменьшении площади листовой пластины и появлении некротических участков.

В табл. 2 представлено накопление сырой и сухой биомассы проростками *Ageratum houstonianum* Mill при различной концентрации загрязнения почвы ионами меди (0; 0,5; 1; 1,5; 2 ПДК). Установлено, что внесение ионов меди не оказывало выраженного отрицательного влияния на процессы накопления биомассы данного вида, а наблюдалось увеличение данного показателя. Максимальное повышение накопления сырой биомассы отмечено при 0,5 ПДК и составлял 4 % относительно контроля, при 1 ПДК прирост составлял 3 %. При повышении концентрации до 1,5 ПДК наблюдалось незначительное снижение показателя на 2 %, тогда как при 2 ПДК вновь фиксировалось увеличение сырой массы на 1 %. Аккумуляция сухой биомассы оставалась стабильной и варьировала в пределах от 2 до 4 %, не демонстрируя существенных отклонений от контрольных значений, что свидетельствует об устойчивости *Ageratum houstonianum* Mill. к загрязнению почвы медью.

В отличие от этого, у *Calendulae officinalis* L. воздействие ионов меди приводило к выраженному угнетению процессов накопления биомассы. Причём отрицательный эффект проявлялся уже при минимальной концентрации поллютанта (табл. 3).

Таблица 2

Накопление биомассы проростками *Ageratum houstonianum* Mill.

№ варианта	Масса 1 проростка, г					
	Сырая			Сухая		
	M ± m	D	$D^{\%}$	M ± m	D	D^{D}
1	0,365±0,023	–	–	0,022±0,024	–	–
2	0,398±0,02	0,033	109,04	0,029±0,023	0,007	131,82
3	0,389±0,023	0,024	106,58	0,029±0,023	0,007	131,82
4	0,36±0,024	-0,005	98,63	0,027±0,023	0,005	122,73
5	0,367±0,024	0,002	100,55	0,025±0,024	0,003	113,64

Примечание: D – разница между средними; $D^{\%}$ – % от контроля

Таблица 3

Накопление биомассы проростками *Calendulae officinalis* L.

№ варианта	Масса 1 проростка, г					
	Сырая			Сухая		
	M ± m	D	$D^{\%}$	M ± m	D	D^{D}
1	0,702±0,10	–	–	0,042±0,07	–	–
2	0,655±0,09	-0,047	93,30	0,035±0,07	-0,007	83,33
3	0,552±0,09	-0,15	78,63	0,032±0,06	-0,01	76,19
4	0,232±0,07	-0,47	33,05	0,021±0,05	-0,021	50
5	0,122±0,07	-0,58	17,38	0,022±0,05	-0,02	52,38

Примечание: D – разница между средними; $D^{\%}$ – % от контроля

Так при внесении 0,5 ПДК отмечалось снижение сухой биомассы на 2 % по сравнению с контролем, что свидетельствует о высокой чувствительности данного вида к меди. С увеличением концентрации до 1 ПДК угнетающее действие усиливалось и снижение показателей достигало 3 %. Максимальный токсический эффект фиксировался при 2 ПДК, сухая биомасса уменьшалась на 5 %.

Выводы. Загрязнение среды произрастания ионами меди оказывает неоднозначное влияние на ростовые процессы и накопление биомассы проростков декоративных травянистых растений, что определяется видоспецифическими и физиологическими особенностями, а также уровнем и характером загрязнения.

Установлено, что *Ageratum houstonianum* Mill. характеризуется относительной устойчивостью к повышенным концентрациям меди, что проявляется в отсутствии угнетения ростовых процессов и сохранении стимулирования морфометрических показателей, а также стабильности накопления биомассы при разных концентрация меди. Выявленная устойчивость свидетельствует о потенциальной пригодности данного вида для внедрения в технологии фиторемедиации при восстановлении почв, загрязнённых медью.

Calendulae officinalis L., напротив, демонстрирует высокую чувствительность к ионам меди, что выражается в угнетении ростовых процессов, снижении биомассы и развитии негативных морфологических изменений по мере увеличения концентрации токсиканта. Указанные особенности позволяют рассматривать данный вид в качестве биоиндикатора загрязнения почвы тяжёлыми металлами.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по теме «Диагностика и оптимизация беллигеративных экотопов Донбасса методами биомониторинга и фиторемедиации» (№ FRRE-2026-0030, регистрационный номер ПТНИ 1025073000026-6-1.6.19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alloway, B.J. Sources of heavy metals and metalloids in soils. In: alloway, B. (eds) heavy metals in soils / B.J. Alloway // Environmental pollution. – 2013. – Vol. 22. – P. 11-50.
2. Алтынбекова, М.О. Исследование содержания меди в почве и растениях / М.О. Алтынбекова, Д.К. Сулайманова // Студенческий научный форум – 2018 : Материалы X Международной студенческой научной конференции. – Москва, 2018. – 3 с.
3. Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова г. Северодвинска / Ю. С. Коробицина, Л. Ф. Попова, А. И. Васильева, Т. В. Усачева // Научный диалог. – 2013. – № 3(15): Естествознание. Экология. Науки о земле. – С. 75–93.
4. Елизарьева, Е.Н. Особенности выбора фиторемедиационных технологий очистки почв и сточных вод от ионов тяжелых металлов. / Е.Н. Елизарьева, Ю.А. Янбаев, А.Ю.Кулагин // Вестник Удмуртского университета: Биология. Науки о земле.– 2016. – Т. 26, № 3. – С. 7-19.
5. Кушина, И.В. Календула – популярное лекарственное и декоративное растение / И.В. Кушина, М. Ю. Карпухин // Аграрное образование и наука. – 2019. – № 3 – 5 с.
6. Phytotechnologies: importance in remediation of heavy metal-contaminated Soils / M. Khan, A. Zaidi, R. Goel, J. Musarrat // Iomanagement of metal-contaminated soils. Environmental pollution. – 2011. – Vol. 20. – P. 277-295
7. Puig, S. Function and regulation of the plant COPT family of high-Affinity copper transport proteins / S. Puig // Advances in Botany. – 2014. – 9 p.
8. Иванищев, В.В. Биоаккумуляция, гомеостаз и токсичность меди в растениях / В.В. Иванищев // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2020. – № 1.– С. 33-41.
9. Бочарников, В.С. Способ биологической очистки почвы, загрязненной тяжелыми металлами / В.С. Бочарников // Известия нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2022. –Т. 2 (66). – С. 347-353. – DOI 10.32786/2071-9485-2022-02-43
10. Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil / A. Miotto, C.A. Ceretta, G.Brunetto, F.T. Nicoloso // Plant Soil. – 2014. – Vol. 374 – P. 593–610
11. Copper is absorbed by plants in form. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.toppr.com/ask/question/copper-is-absorbed-by-plants-in-form/ (дата обращений: 06.11.2023)
12. Nutrient and toxin all at once: How plants absorb the perfect quantity of minerals. ScienceDaily. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedaily.com/releases/2012/04/120412105428.htm (дата обращений: 06.11.2023)
13. Елисеева, Т. Календула (Ноготки, лат. *Caléndula*) / Т. Елисеева // Журнал здорового питания и диетологии. – 2018. – № 4. – С 1-11
14. Williams, L.E. Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants/ L.E. Williams, J.K. Pittman, J.L. Hall // Biochimica et Biophysica Acta Biomembrane.– 2000. – P. 104-126

REFERENCES

1. Alloway, B.J. (2013) Sources of heavy metals and metalloids in soils. *Environmental Pollution*. 22, 11-50
2. Altynbekova, M.O. & Sulaimanova D.K. (2018) Research on the Content of Copper in Soil and Plants / M.O. Altynbekova, D.K. Sulaimanova // *Materials of the X International Student Scientific Conference «Student Scientific Forum»*. 1-4. (In Russian)
3. Korobitsina, Yu.S., Popova, L.F., Vasilieva, A.I. & Usacheva, T.V. (2013) [Ecological assessment of heavy metal contamination of soils in Severodvinsk]. Nauchnyj dialog = *Scientific Dialogue*. 3(15), 75-93. (In Russian)
4. Elizarieva, E.N., Yanbaev, Yu.A. & Kulagin, A.Yu. (2016) [Features of selection of phytoremediation technologies for purification of soils and wastewater from heavy metal ions]. Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle = *Bulletin of Udmurt University*. Biology. Earth Sciences. 26 (3), 7-19. (In Russian)
5. Kushina, I.V. & Karpukhin, M.Yu. (2019) [Calendula – a popular medicinal and ornamental plant]. Agrarnoe obrazovanie i nauka = Agrarian Education and Science. 3, 5. (In Russian)
6. Khan, M., Zaidi, A., Goel, R. & Musarrat, J. (2011) Phytotechnologies: importance in remediation of heavy metal-contaminated soils. *Iomanagement of Metal-Contaminated Soils. Environmental Pollution*. 20, 277-295.
7. Puig, S. (2014) *Function and regulation of the plant COPT family of high-affinity copper transport proteins.* In: Advances in Botany. 9 p.

8. Ivanishchev, V.V. (2020) [Bioaccumulation, homeostasis and toxicity of copper in plants]. Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki = *Proceedings of Tula State University. Natural Sciences.* 1, 33-41. (In Russian)
9. Bocharnikov, V.S. (2022) [Method of biological remediation of soil contaminated with heavy metals]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = *Proceedings of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2 (66), 347–353. DOI 10.32786/2071-9485-2022-02-43 (In Russian)
10. Miotto, A., Ceretta, C.A., Brunetto, G. & Nicoloso, F.T. (2014) Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil. *Plant and Soil*. 374, 593–610.
11. Toppr (2023). Copper is absorbed by plants in form. Retrieved from: https://www.toppr.com/ask/question/copper-is-absorbed-by-plants-in-form/
12. Nutrient and toxin all at once: How plants absorb the perfect quantity of minerals. Retrieved from: https://www.sciencedaily.com/releases/2012/04/120412105428.htm
13. Eliseeva, T. (2018) [Calendula (Marigold, lat. *Calendula*)]. Zhurnal zdorovogo pitaniya i dietologii = *Journal of Healthy Nutrition and Dietetics*. 4, 1–11. (In Russian)
14. Williams, L.E., Pittman, J.K. & Hall, J.L. (2000) Emerging mechanisms for heavy metal transport in plants. *Biochimica et Biophysica Acta Biomembrane*, 1465, 104-126

Поступила в редакцию 21.04.2026 г.

EFFECT OF COPPER IONS ON GROWTH PROCESSES OF SOME ORNAMENTAL HERBACEUS PLANTS

O. V. Frunze, A. S. Grib

Morphometric indicators and biomass accumulation by *Ageratum houstonianum* Mill. and *Calendulae officinalis* L. seedlings were studied under conditions of copper ions pollution of the growing medium at different levels of their concentration, with an assessment of the toxicant effect on the growth of the root system and the above-ground part of plants, as well as the identification of specific features of resistance to copper stress.

Keywords: growth processes, heavy metals, copper.

Фрунзе Оксана Валентиновна
Кандидат технических наук, доцент;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: hromyh82@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1082-7012
Spin-код: 6993-6990

Frunze Oksana
Candidate of Technical Sciences, Docent;
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.

Гриб Алина Сергеевна
Студент 2 курса магистратуры;
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: alinagrib03@mail.ru

Grib Alina Sergeevna
2nd year Graduate student;
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, RF.