

УДК 574

РОЛЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ

Карымсакова Дана Алмасовна

Karymsakova.da@mail.ru

Магистрант 2-го курса специальности «7М05206 Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан
Научный руководитель – Зандыбай А.

Аннотация. В статье подробно рассмотрены различные исследования, касающиеся источников тяжелых металлов, механизма их поглощения, основных переносчиков, а также конструктивные обсуждения деструктивных свойства тяжелых металлов в ответ на их концентрацию. Таким образом, на основании достоверного количества отчетов об исследованиях определено, что необходимое количество тяжелых металлов может изменить физиологические и морфологические характеристики растений. И в дальнейшем станет необходимым расширить дальнейшие программы для лучшего понимания всего механизма, лежащего в основе синергетического и антагонистического действия тяжелых металлов на растения, чтобы увековечить экологическую гармонию земного шара.

Ключевые слова: тяжелые металлы (ТМ), кобальт (Co), медь (Cu), железо (Fe), марганец (Mn), молибден (Mo), никель (Ni), цинк (Zn), Организация Объединенных Наций (ООН), физиология, биохимия, дифференциальный уровень токсичности.

Тяжелые металлы (ТМ) существуют в окружающей среде как в незаменимых, так и в заменимых формах. Эти ионы ТМ поступают в почву из различных источников, как естественных, так и антропогенных. Основные ТМ, такие как кобальт (Co), медь (Cu), железо (Fe), марганец (Mn), молибден (Mo), никель (Ni) и цинк (Zn), играют полезную роль в росте и развитии растений. На оптимальном уровне эти полезные элементы улучшают уровень питания растений, а также несколько механизмов, необходимых для нормального роста и повышения урожайности растений. Диапазон их оптимальности для наземных растений разнообразен. Растения поглощают тяжелые металлы в виде растворимого компонента или растворяют их в корневых экссудатах. В то время как их присутствие в избытке становится токсичным для растений, что переключает способность растения поглощать и накапливать другие несущественные элементы. Повышенное количество ТМ в тканях растений оказывает прямое и косвенное токсическое воздействие. Такими прямыми эффектами являются генерация окислительного стресса, который еще больше усугубляет ингибирование цитоплазматических ферментов и повреждение клеточных структур. Хотя опосредованное обладание – это замещение необходимых питательных веществ на участках катионного обмена растений. Эти ионы легко влияют на роль различных ферментов и белков, тормозят метаболизм, проявляют фитотоксичность.

В связи с недавними достижениями в области полезных ионов ТМ Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni и Zn в системе почва-растение в настоящей статье: обзор источников ТМ в почвах и

механизма их поглощения и транспортировки, здесь мы обсудили роль переносчиков металлов в транспортировке основных ионов металлов из почвы в растения. Также обсуждалась роль Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni и Zn как на низком, так и на высоком уровне в росте и развитии растений, а также механизм снижения токсичности металлов на высоком уровне. В заключении статьи мы также обсудили будущую перспективу в отношении полезного взаимодействия ионов ТМ с растением на обоих уровнях.

Геномы растений кодируют ряд транспортеров, которые специфичны в отношении субстратной специфичности, экспрессии и клеточной локализации, чтобы управлять транслокацией этих металлов в целое растение. Эти металлы играют полезную роль для роста, развития и продуктивности растений при оптимальной концентрации в виде незаменимого микроэлемента. Для роста и завершения жизненного цикла растения используют эти незаменимые микроэлементы. Растения поглощают эти важные тяжелые металлы, такие как железо, цинк, медь и марганец, из почвы благодаря градиентам концентрации и избирательному поглощению этих металлов. Эти ионы с энтузиазмом влияли на функцию многих ферментов и клеточный метаболизм. Эти металлы также играют заметную роль в синтезе белка, нуклеиновых кислот, фотосинтетического пигмента, а также принимают участие в структурно-функциональной целостности клеточных мембран. Например, медь является незаменимым тяжелым металлом, активно участвующим в фотосинтезе. Марганец является важным компонентом различных метаболических ферментов, таких как малликдегидрогеназа и оксалосукцинатдекарбоксилаза, кобальт обнаружен в форме Vitmain B12, а Fe действует как кофактор цитохрома. Хотя концентрация этих ионов тяжелых металлов в почвах сильно изменяется в результате произвольной деятельности человека и различных природных процессов. Повышенная концентрация этих полезных ионов оказывает токсическое действие на клетки растений. Эти эффекты могут быть заменены основными функциональными группами, повреждением клеток, образованием активных форм кислорода (АФК), нарушением различных метаболических реакций путем изменения ферментативной активности. Что касается вышеизложенных фактов, заметно, что лишь ограниченное количество этих полезных тяжелых металлов необходимо для роста растений и метаболической функции. Поэтому в данной статье мы подробно рассмотрели различные исследования, касающиеся источников тяжелых металлов, механизма их поглощения, основных переносчиков, а также обсудили конструктивные и деструктивные свойства тяжелых металлов в ответ на их концентрацию.

Растения часто чувствительны как к низкой, так и к высокой доступности некоторых ионов тяжелых металлов в качестве незаменимых микроэлементов. Полезные тяжелые металлы в больших количествах могут нарушить почвенную среду, что последовательно отрицательно повлияет на плодородие почвы, рост и развитие растений. Пороговый уровень 10 ppm для Ni и 50 ppm для Co оказался не повреждающим для нута (таблица 1, рисунок 1).

Таблица 1. Влияние полезных тяжелых металлов на различные растения при низком уровне.

Metals	Plants	Metal concentration at low level	Impacts on plant	References
Co	Cowpea (<i>Vigna unguiculata</i>)	8 ppm	Enhanced plant growth and yield, induced nodulation, maintained the level of mineral composition and chemical constituent.	Gad et al., 2013
Co	Maize (<i>Zea mays</i> L.)	50 mg Co kg ⁻¹	Increased seedling growth, photosynthetic pigments viz., chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll contents. Elevated the level of total sugars, starch, amino acids, protein content, and mineral content.	Jabeel et al., 2008
Cu	Wheat (<i>Triticum aestivum</i> cv. Harsawa)	2 mM	Promoted growth and increased biochemical parameters, increased the biosynthesis of free amino acid, proline, and activity of antioxidant enzymes.	Azooz et al., 2012
Mn	Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) seedling	7.6-8.6 mg kg ⁻¹	Middle leaves of tomato seedling showed optimal plant growth. Normal chlorophyll content observed. Elevated the level of Fe in shoots. Produced cytosolic CuZn-SOD and chloroplastic CuZn-SOD activities.	Shenkar et al., 2004
Mo	Glycymize <i>ultralis</i>	0.52 mgL ⁻¹ and 5.2 mgL ⁻¹	Promoted the Secondary metabolic process of glycyrrhizic acid content and its biosynthetic precursor squalene. Also promoted the expression of the key synthase b-AS gene.	Wang et al., 2013
Mo	Bengal gram (<i>Cicer arietinum</i>)	1.5-4.5 ppm	Increased root and shoot length. Significantly increased fresh weight and dry weight of seedling. Increase germination. Increased ascorbic acid concentration total soluble sugar and chlorophyll content.	Datta et al., 2011
Zn	<i>Mentha piperita</i>	1, 1.5, 2, 2.5, 3, and 3.5 ppm	Recorded increased number of leaves/plant. Elevated level of essential oil, enhanced the growth and seed yield.	Akhtar et al., 2009
Zn	Groundnut (<i>Arachis hypogaea</i>) and wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	2.5, 5.0, 7.5 kg/ha	Increased kernel yield, improved the kernel weight, oil, and protein content, increased biomass production.	Rana and Noman, 2016

Ni при содержании более 50 мкг Ni/г сухого веса отрицательно влияет на рост растений на многих уровнях, таких как морфологический, физиологический и биохимический. Баккаус и др. (2005) указали среднюю концентрацию Co для растений от 0,1 до 10 мкг/г сухого веса, а также уточнили полезную роль Co для нормального метаболического функционирования растений при низкой концентрации (таблица 2; рисунок 1). Принимая во внимание, что в нескольких исследованиях уже было доказано токсическое действие Co при более высоких концентрациях, которые становятся токсичными для нормального роста и развития растений и в то же время изменяют некоторые процессы внутри растительной клетки.

Джаякумар и др. в 2008 г. сообщили об улучшении всхожести семян и увеличении длины корешка и перышка раги и риса при низкой дозе Co (5 мкг л⁻¹), в то время как обратное состояние наблюдалось при высокой дозе (25–100 мкг Co л⁻¹). Избыток Cu препятствует росту растений и отключает клеточные процессы, такие как транспорт электронов при фотосинтезе. Ли и др. (2009) изучали токсичность Co на ячмене, масличном рапсе, томате и обнаружили, что Co снижает рост побегов и биомассу растения (табл. 2; рис. 1).

Чан и Хан (2010) провели эксперимент на нуте для оценки влияния никеля и кобальта при более низких (0, 10, 50 частей на миллион) и более высоких (100, 200 и 400 частей на миллион) концентрациях, полученные результаты показали, что в высоких концентрациях Ni и Co вызывают токсичность растения нута, снижая его рост и биомассу, всхожесть семян, содержание хлорофилла, вызывая повреждение побегов и корней, хлороз листьев, подавление клубеньков на корнях и, наконец, отрицательно сказываются на урожайности растения (табл. 2; рис. 1).

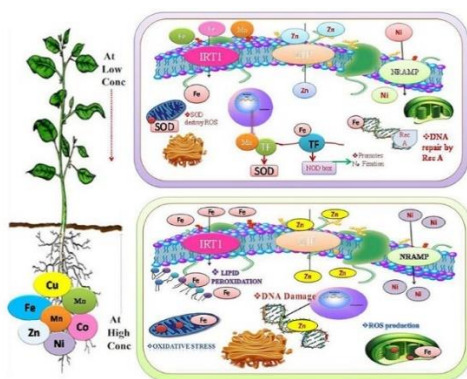


Рисунок 1. Полезные тяжелые металлы в почвах

Cu, присутствующая в почве в больших количествах, вызывает цитотоксическое повреждение растений, что приводит к замедлению роста растений и вызывает хлороз. Токсичность меди отрицательно влияет на рост, сухое вещество и урожай *Vigna radiata*, а также на рост и окислительный механизм чайного растения. Де Дорлодот и др. (2005), когда растение подвергается повышенному поглощению и перемещению Fe²⁺ растением, появляется токсичность Fe (таблица 2; рисунок 1). Более того, Арора (2002) установили, что повышенный уровень Fe²⁺ в растении индуцирует образование свободных радикалов, вызывающих повреждения мембран, ДНК и белков (табл. 2; рис. 1). Wu, также изучали токсичность железа в растениях риса.

Mn на более высоком уровне становится токсичным для растений, вызывая ряд повреждений, таких как остановка метаболических процессов растений и нарушение фотосинтетического механизма. Также сообщалось, что марганец ингибирует рост корней у сои. Сообщалось, что уровень 3,0 ppm Mo на экспонированном металлоторолерантном гидрофите *Tiara patans* вызывал искажение ткани мезофилла в листьях, при 10 ppm клетки становятся недифференцированными, а при концентрации Mo 50–600 мкМ вызывал изменение морфологии растений, физиологии, особенно нарушая фотосинтез. активности.

Избыток Мо является основным фактором снижения роста растений и урожайности в плохо дренированной кислой почве, что является подходящим условием для доступности Мо.

Датта и др. (2011) сообщили, что; у *Cicer arietinum* концентрация Мо более 7,5 ppm уменьшила длину корня и побега, а при концентрации более 1,5 ppm изменяла анатомию растения. Точно так же Kumchai et al. (2013) проиллюстрировали свое исследование в контексте высокого уровня Мо (10 мМ), воздействующего на капусту (*Brassica oleracea*), они сообщили о результатах исследования, что Мо уменьшил длину корня и гипокотилей, а также длину и ширину семядолей. Изосимова (2005) сообщила о концентрации никеля (200–26 000 мг/кг) в загрязненной почве по сравнению с оптимальным уровнем концентрации никеля (10–1000 мг/кг) в естественной почве (таблица 2; рисунок 1). Как утверждает Рахман и др. (2005) Ni²⁺ при повышенном уровне приводит к многочисленным токсическим эффектам (хлорозу и некрозу) и физиологическим изменениям видов растений.

Кроме того, Pandey and Sharma (2002) уточнили, что у видов растений Ni²⁺ вызывает снижение содержания воды, это снижение используется для выявления стресса Ni²⁺ у растений. Theriault и Nkongolo (2016) сообщили о токсичности никеля и меди у белой березы (*Betula papyrifera*). По данным Warne et al. (2008) описали, что повышенная концентрация Zn в почве препятствует метаболическим функциям растений, что вызывает старение и замедление роста. При повышенных концентрациях Zn оказывает цитотоксическое действие на рост и метаболизм растений (табл. 2; рис. 1). Это приводит к серьезным изменениям в ядрышках клеток кончиков корней, разрушению клеток коры и разбавлению ядерной мембраны при дозе цинка 7,5 мМ (Rout and Das, 2009). Аналогичные результаты были получены Liu et al. (2016) у *Solanum nigrum*

Таблица 2. Влияние полезных тяжелых металлов на различные растения на высоком уровне.

Metals	Plants	Metal concentration at high level	Impacts on plant	References
Co	Mung beans	5 µM	Inhibited seedling growth. Caused chlorosis in young leaves. Reduced the Mn concentration in roots and Fe concentration in leaves thus inhibited plant growth.	Liu et al., 2000
Co and Ni	Maize genotypes	125, 250 mg/L Co 160 mg/L Ni	Showed negative effects on seed germination index, therefore reduced maize seed germination.	Ebru, 2014
Co and Ni	Chickpea (<i>Cicer arietinum</i>)	100, 200, and 400 ppm	Reduced Seed germination, plant growth, biomass production, and leaf chlorophyll content. Suppressed Root nodulation and decreased number of functional nodules.	Khan and Khan, 2010
Cu	<i>Phaseolus vulgaris</i>	500 µM	Reduced length and fresh and dry weights of the embryonic axis of germinating bean seeds. Decreased growth 50%. Increased level of albumin and globulin content	Karmous et al., 2015
Cu	<i>Withania somnifera</i>	200 µM	Reduced length of root, shoot, and leaf, and total number of leaves per plant. Decreased antioxidant activities. Alteration in protein profile	Rout et al., 2013
Fe	<i>Eugenia uniflora</i> L.	1.0 and 2.0 mM	Caused oxidative stress (production of ROS). Reduced root and shoot growth. Increased lipid peroxidation in leaves. Increased SOD and GR activity. Limited increase in CAT, POX, and APX activities while decrease in GPX activity. AA and GSH contents and the AA/DHA and GSH/GSSG ratios increased.	de Oliveira Jucoski et al., 2013
Fe	Sweet potato (<i>Ipomoea batatas</i> L.)	4.5, and 9.0 mmol L ⁻¹	Decreased Height, leaf area, and total biomass. Decreased Mn nutrient concentration. Increased SOD and APX. Reduced stomatal densities. radical cells displayed mitochondrial impairment.	Adamski et al., 2012
Fe	potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	0.1–2.0 mM	Hindered growth, reduced chlorophyll content in older leaves, and Hill reaction activity. Changed the behavior of enzymatic activities and Fe and Mn concentration. Decreased sugars, starch, and protein nitrogen content and elevated the level of non-protein nitrogen and phenols in tubers thus Reduced tuber yield and its quality.	Chatterjee et al., 2006
Mn	Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	24.0 mg dm ⁻³	Reduced fresh weight of leaves, stalks, shoots and fruits, and biomass production. Declined quality and yield of tomato. Adversely affects nutrient uptake	Khalber and Graje, 2015
Mn	Chamomile (<i>Matricaria chamomilla</i>)	1000 µM	Hindered seedling growth. Caused oxidative stress and inhibit growth of seedling and plant. Decreased POD activity.	Kováčik et al., 2014
Mo	Black gram (<i>Vigna mungo</i> L.)	2 µM	Declined total dry matter, seed yield, and seed protein, increased activity of nitrate reductase. Reduced content of starch, sugars, protein, and nitrogen. Increasing electrical conductivity of seed leachate thus deteriorated seed quality.	Gopal et al., 2015
Mo	Chickpea (<i>Cicer arietinum</i> L.)	2 mg dm ⁻³	Reduced pod and seed yield, decreased the concentrations of starch, reducing, non-reducing, and total sugar content. Declined level of methionine, lysine, legumin, vicilin, total proteins, and protein and non-protein nitrogen in seeds. Deteriorated the seed quality by increasing the content of phenols, cysteine, and albumin.	Nautiyal et al., 2005
Ni	Maize (<i>Zea mays</i>)	200 µM	Decreased content of chlorophyll a and rate of Hill reaction. Increased K ⁺ efflux and carbohydrate leakage from roots and then cell death of root tips. Increased level of ROS generation.	Ghassemi et al., 2012
Ni	Potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	0.5–0.5 mM	Decreased levels of sugars, starch, and protein nitrogen and elevated accumulation of non-protein nitrogen and phenols in tubers. Increased non-reducing sugars, starch, and phenols levels in leaves.	Shukla, 2010
Zn	Wheat seedling (<i>Triticum aestivum</i>)	3 mM	Decreased total chlorophyll content and chl a, and chl b. significantly increased MDA and H ₂ O ₂ content in leaves. Increased level of soluble sugar and proline in both leaves and roots. Inhibited POD and GR activities.	Li X. et al., 2013
Zn	Tea (<i>Camellia sinensis</i> L.)	30 µM	Reduced shoot and root fresh and dry weight. Disorganization of cellular organelles occurred. Reduced net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and chlorophylls a and b contents. Caused oxidative damage Elevated the level of ROS generation.	Mukhopadhyay et al., 2013

Тяжелые металлы, такие как Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni и Zn, считаются полезными элементами, которые необходимы растениям в небольших концентрациях, их концентрация при высоком уровне становится токсичной для растений на множественном уровне. Таким образом, исследователи в ходе различных исследований предложили различные механизмы

снижения токсичности ТМ. Зейд и др. (2013) уменьшили токсичность кобальта из *Medicago sativa* путем предварительной обработки растворов ТМ осаждением и ЭДТА (этилендиаминтетрауксусной кислотой), что уменьшило их замедляющее воздействие на рост и метаболическую активность. Ли и др. (2008) в своем эксперименте на арабидопсисе *thaliana*, подвергнутом стрессу с медью, уменьшили токсичность меди с помощью кремния. Таким образом, Si (кремний) уменьшал хлороз листьев и увеличивал биомассу корневых побегов.

Это также уменьшило стресс-индуцированный фермент (фенилаланин-аммиак-лиаза). Si снижал уровень РНК генов переносчиков меди *Arabidopsis*; транспортер меди 1 (СОРТ1) и субъединица 5 АТ Фазы тяжелых металлов (НМА5). Таким образом, оказалось, что Si повышает устойчивость растений к токсичности Си на нескольких уровнях.

Почва является важнейшим компонентом, в который ежегодно накапливается значительное количество опасных химических загрязнителей из различных источников. Помимо того, что почва ведет себя как негабаритный поглотитель химических загрязнителей, она также служит естественным буфером, регулируя общий перенос химических веществ в окружающую среду.

Растения отражают частую чувствительность как к низкой, так и к высокой концентрации тяжелых металлов, при низком уровне они служат благоприятным компонентом для роста и развития растений, но при повышении его концентрации выше порогового предела он оказывает несколько неблагоприятных воздействий на растения, тем самым отрицательно влияя на почву, плодovitость и развитие. Медленное, но постоянное загрязнение сельскохозяйственных почв загрязнителем тяжелыми металлами может нанести существенный вред окружающей среде и создать основные угрозы для здоровья населения, а также создать основные вопросы для последующего обсуждения, так как он накапливается в почве и проявляет значительное накопление в сельскохозяйственных культурах. Согласно отчету ФАО (продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН) (2009 г.), население мира растет быстрыми темпами и, по прогнозам, к 2050 г. достигнет около 9,6 млрд человек. сельское хозяйство и производство продуктов питания. Некоторые ТМ, такие как Со, Си, Fe, Mn, Мо, Ni и Zn, считаются полезными для роста и развития растений. Растения требуют их в ограниченном количестве. Принимая во внимание, что на высоком уровне эти ионы металлов имеют тенденцию создавать дифференциальный уровень токсичности для растений, что, в свою очередь, приводит к ингибированию роста растений, остановке ферментативных и метаболических путей, а также вызывает повреждения морфологии и физиологии растений, что в конечном итоге снижает общую продуктивность растений.

Таким образом, на основании достоверного количества отчетов об исследованиях можно четко определить, что только необходимое количество тяжелых металлов может изменить физиологические и морфологические характеристики растений. Таким образом, станет необходимым расширить дальнейшие программы для лучшего понимания всего механизма, лежащего в основе синергетического и антагонистического действия тяжелых металлов на растения, чтобы увековечить экологическую гармонию земного шара. Учитывая перспективы на будущее, следует приложить усилия для полного снижения чрезмерного уровня индуцированной токсичности основных ионов металлов в тканях растений. Выявление механизма транспорта на молекулярном уровне также должно быть эффективным в контексте выделения полезного иона ТМ, а также надежности одного иона металла в гомеостазе другого иона металла. Существует потребность в тщательном изучении механизма поглощения и перемещения металлов в связи с их влиянием на рост и развитие растений, чтобы идти в ногу со здоровым сельскохозяйственным производством.

Список использованных источников

1. Adamski, J. M., Danieloski, R., Deuner, S., Braga, E. J., de Castro, L. A., and Peters, J. A. (2012). Responses to excess iron in sweet potato: impacts on growth, enzyme activities, mineral concentrations, and anatomy. *Acta Physiol. Plant.* 34, 1827–1836. doi: 10.1007/s11738-012-0981-3.
2. Akhtar, N., Sarker, M. A. M., Akhter, H., and Nada, M. K. (2009). Effect of planting time and micronutrient as zinc chloride on the growth, yield and oil content of *Mentha piperita*. *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 44, 125–130. doi: 10.3329/bjsir.v44i1.2721
3. Ali, M. A., Asghar, H. N., Khan, M. Y., Saleem, M., Naveed, M., and Niazi, N. K. (2015). Alleviation of nickel-induced stress in mungbean through application of gibberellic acid. *Int. J. Agric. Biol.* 17, 990–994. doi: 10.17957/IJAB/15.0001
4. Bakkaus, E., Gouget, B., Gallien, J. P., Khodja, H., Carrot, F., Morel, J. L., et al. (2005). Concentration and distribution of cobalt in higher plants: the use of micro-PIXE spectroscopy. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 231, 350–356. doi: 10.1016/j.nimb.2005.01.082