

УДК 504.064: 57.083

**Влияние тяжелых металлов (Cd, Cu и Pb) на параметры роста растений
и фиторемедиационную способность кукурузы***Тсегай М.К., Сухенко Л.Т.**Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева***Аннотация**

Загрязнение тяжелыми металлами в настоящее время является серьезной глобальной экологической проблемой. Тяжелые металлы загрязняют почвы, на которых растут сельскохозяйственные культуры и овощи. Кукуруза (*Zea mays L.*) широко используется для фиторемедиации из-за ее высокого выхода биомассы и способности аккумулировать металлы. В зависимости от свойств растений и почвы некоторые металлы могут быть опасны в больших количествах. Во время нашего эксперимента "in vitro" в питательную среду вводили различные уровни Cd, Cu и Pb, чтобы растения кукурузы могли развиваться в различных условиях. В ходе исследования были изучены многочисленные особенности роста при определенных условиях металлического стресса, включая прорастание семян, высоту растений, биомассу и содержание хлорофилла, а также симптомы и механизмы токсичности наиболее распространенных тяжелых металлов. Исследование показало, что, хотя растение кукурузы является хорошим аккумулятором тяжелых металлов, высокие концентрации тяжелых металлов оказали негативное влияние на несколько показателей роста: при 250 ppm Cd ингибировал прорастание семян в неволе на 50% и прорастание диких семян на 42,9%; Pb подавлял прорастание семян в неволе на 57% и всхожесть семян в дикой природе на 42,9%; и Cu ингибировали прорастание семян обоих типов на 40%. Аналогично, высота растений уменьшалась в следующем порядке: Pb (36,2%), Cd (24,8%) и Cu (9,7%) для пленного семенного растения, а также Pb (46,7%), Cd (28%) и Cu (13%) для дикорастущих семенных растений.

Ключевые слова: КУКУРУЗА, СТРЕСС, ТОКСИЧНОСТЬ, ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ, ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ, БИОАККУМУЛЯЦИЯ

Введение

Загрязнение почв тяжелыми металлами исторически является одной из наиболее серьезных экологических проблем, особенно потому, что их стойкая токсичность наносит серьезный ущерб экосистемам, приводит к экономическим потерям и негативно влияет на пищевую цепочку человека и его здоровье. Это абиотические факторы окружающей среды, определяемые как металлы с плотностью более 5 г/см³, такие как кадмий (Cd), хром (Cr), медь (Cu), свинец (Pb), никель (Ni), кобальт (Co), мышьяк (As), серебро (Ag), и так далее. Эти тяжелые металлы различаются по физическим и химическим свойствам и считаются существенными загрязнителями окружающей среды из-за их токсичного взаимодействия со свойствами почвы, растений, животных и человека [1, 2].

Различные методы ведения сельского хозяйства, такие как использование промышленных и канализационных сточных вод для орошения сельскохозяйственных культур, постоянно приводят к попаданию тяжелых металлов в сельскохозяйственную почвенную систему. При орошении овощей и кормовых культур используется этот тип сточных вод, которые сбрасываются в пресноводные водоемы, особенно в результате промышленной добычи полезных ископаемых. Среди многих подходов, используемых для рекультивации загрязненных земель, фиторемедиация в настоящее время считается многообещающей и экономически эффективной альтернативой. В соответствии с этой стратегией растения используются для улучшения качества почвы и/или воды путем удаления или транспортировки загрязняющих веществ из различных частей почвы. Это не влияет на биологическую активность, структуру или плодородие почвы, но тяжелые металлы могут нанести вред растениям, которые проводят очистку [3, 4].

Хорошо известно, что фиторемедиация является экономически эффективным и экологически безопасным подходом к успешному устранению загрязнения почвы тяжелыми металлами и ее пересадке. Многие виды высших растений, известные как гипераккумуляторы, могут сохранять в своих тканях исключительно высокие концентрации металлов, не проявляя при этом токсичности при фиторемедиации [5]. В недавних исследованиях приобрело значение растительное восстановление почв, загрязненных тяжелыми металлами. Больше количество этих металлов можно найти в "Thlaspi sp" (Тласпи сп), кукурузе, подсолнечнике, рисе, пшенице и других растениях. Тип загрязнения металлами, вид растений, а также дополнительные химические и

климатические факторы определяют сколько металла накапливается в растениях. Кукуруза (*Zea mays L.*), выращиваемая во многих различных агроэкологических ситуациях по всему миру, является универсальной зерновой культурой. Существует около пятидесяти видов с различными сортами, текстурой, размерами и формами зерен. Красный, желтый и белый — наиболее распространенные оттенки [6, 7].

При исследовании токсичности тяжелых металлов для растений важно учитывать природу загрязнения. Стресс, вызванный загрязнением почв, является длительным, что требует учета долгосрочных молекулярных реакций, а не краткосрочных [8]. Большинство исследований проводилось в гидропонных культурах или в культурах в пробирке (*in vitro*) с использованием очень высоких концентраций металлов в питательной среде. Это редко соответствует реальной среде обитания и отражает последствия острого стресса, вызванного одним-единственным видом металла. Во-вторых, уровень токсичности тяжелого металла зависит от его степени окисления [9]. Например, Cr (VI) является наиболее опасной формой Cr и обычно образует хроматные (CrO_4^{2-}) или дихроматные ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) оксианионы с кислородом. Cr (III) менее подвижен, менее токсичен и преимущественно связан с органическими веществами в почве и водной среде. Для корней растений удержание тяжелых металлов в почве в биодоступном состоянии зависит от их адсорбции, десорбции и образования комплексов с другими молекулами почвы. На эти процессы большое влияние оказывают pH, содержание и структура почвы [10]. Тяжелые металлы проявляют повышенную подвижность в кислых почвах, и их токсичность варьируется в зависимости от вида. Растения, устойчивые к металлам и гипераккумулирующие их, обладают защитными механизмами, которые защищают их от повреждений, вызванных стрессом, вызванным тяжелыми металлами. На чувствительность к тяжелым металлам влияют такие факторы, как продолжительность и интенсивность воздействия, а также другие условия окружающей среды [11].

Кадмий (Cd) - один из наиболее фитотоксичных тяжелых металлов, поскольку он хорошо растворим в воде и быстро усваивается растениями. Это также является его основным звеном в пищевой цепи, что делает его опасным для здоровья человека. Даже при низких концентрациях поглощение Cd корнями и его транспортировка к вегетативным и репродуктивным органам оказывают негативное влияние на минеральное питание, гомеостаз, рост и развитие растений [12, 13]. Cd подавляет рост корней и образование

боковых корней с сопутствующей дифференцировкой многочисленных корневых волосков. В тканях побегов наиболее очевидными симптомами токсичности Cd являются сворачивание листьев, хлороз, нарушение водопоглощения и закрытие устьиц. Хлороз может отражать изменения в соотношении Fe: Zn, которые негативно влияют на метаболизм хлорофилла. Cd вызывает закрытие устьиц независимо от состояния воды, вероятно, из-за его сходства с Ca [14].

Cd нарушает как клеточный, так и органеллярный метаболизм, нанося ущерб фотосинтетическому оборудованию хлоропластов, в частности светособирающему комплексу II и двум фотосистемам (PSI и PSII), которые наиболее чувствительны. Это уменьшает количество хлорофилла и каротиноидов, увеличивает нефотохимическое тушение и снижает эффективность фотосинтеза и квантовый выход. Кроме того, Cd ингибирует ферменты, участвующие в фиксации CO₂, снижая усвоение углерода [13]. Cd также изменяет метаболизм серы в хлоропластах, увеличивая образование тиоловых соединений и снижая активность АТФ-сульфуриказы и О-ацетилсеринсульфуриказы, которые являются первыми и последними ферментами в процессе ассимиляции сульфатов. Cd токсичен на клеточном уровне, вмешиваясь в митоз и подавляя деление клеток из-за хромосомных aberrаций и ингибирования митотических процессов.

Медь (Cu) является важным элементом, который служит как структурным компонентом регуляторных белков, так и окислительно-восстановительным компонентом для переноса электронов в хлоропластах и митохондриях. Медь также участвует в качестве кофактора в таких ферментах, как Cu-SOD (супероксиддисмутаза), цитохромоксидаза, пластоцианин и лакказы, тем самым участвуя в ряде метаболических процессов, таких как передача гормональных сигналов, метаболизм клеточной стенки и реакция на стресс [15]. Симптомы дефицита меди включают хлороз и некроз на кончиках листьев, а также их скручивание и деформацию, что отражает нарушение фотосинтетического переноса электронов, потерю необходимых пигментов и дегенерацию тилакоидов. Медь в растениях существует в двух степенях окисления: Cu²⁺ и Cu⁺, и окислительно-восстановительный цикл между этими состояниями приводит к образованию гидроксильных радикалов [16, 17]. Более того, поскольку Cu является окислительно-активным переходным металлом, он может генерировать активные формы кислорода (АФК) непосредственно в ходе реакций Фентона или Хабера-Вайса, катализируя образование гидроксильных радикалов (ОНО) в

результате неферментативных химических реакций между H_2O_2 и супероксидным анионом (O_2^-). Эта способность продуцировать АФК является основным механизмом токсичности Cu для растений. Другие видимые симптомы токсичности Cu включают задержку роста, замедление прорастания и развитие боковых корней [18].

Свинец (Pb) - один из наиболее распространенных тяжелых металлов как в наземной, так и в водной среде. Он занимает второе место по токсичности в земной коре и токсичен для человека и других живых существ, включая растения. Его плотность составляет $11,34 \text{ г/см}^3$ [19]. Pb в основном образуется в результате деятельности человека, такой как добыча полезных ископаемых, плавка, использование топлива и взрывчатых веществ, а также удаление обогащенного Pb осадка городских сточных вод. Кроме того, Pb в виде солей или оксидов также попадает в окружающую среду через атмосферную пыль и автомобильные выхлопы [1]. Наряду с Cd, Pb также считается одной из наиболее серьезных опасностей для здоровья человека, поскольку он легко усваивается растениями и, следовательно, может легко попасть в пищевую цепочку. Токсичность Pb вызывает симптомы, сходные с симптомами других тяжелых металлов, а именно угнетение роста, хлороз и гибель. Корни, поглощающие Pb, реагируют на это снижением скорости роста и изменением структуры ветвления. У кукурузы Pb нарушает организацию сети микротрубочек корневой меристемы, что приводит к укорочению зоны ветвления и появлению более компактных боковых корней, расположенных ближе к кончикам корней [12]. Как Cd, так и Pb оказывают сильное влияние на различные показатели роста растений, подвергнутых воздействию (пшеница, кукуруза, ячмень, подсолнечник, горчица и соя) и подавляют прорастание семян, высоту растений, длину корневых побегов, сухую массу всходов, индекс толерантности, количество листьев и фотосинтез. Pb подавляет рост корней, что снижает потребление питательных веществ и усвоение азота [10].

Цель исследования состояла в том, чтобы проиллюстрировать влияние металлов на развитие растений кукурузы и их способность усваивать металлы в лабораторных условиях.

Материалы и методы

Этот эксперимент был проведен в Сельскохозяйственном и научно-исследовательском лабораторном центре Астраханского государственного университета в

Российской Федерации. Для этого эксперимента использовались два типа семян кукурузы: упакованные семена, купленные в магазине (семена в неволе) и другие семена, просто собранные для выращивания растений кукурузы в открытом грунте (дикорастущие семена).

Определение токсичности тяжелых металлов: для оценки токсичности тяжелых металлов для экспериментального растения кукурузы во время фиторемедиации в лаборатории были проведены отдельные эксперименты на чашках Петри и в горшках при температуре от 25 °С до 30 °С и влажности от 50% до 60%. В эксперименте использовались выращенные в открытом грунте (дикорастущие семена) и упакованные семена кукурузы (рис. 1А). Был приготовлен исходный раствор из солей тяжелых металлов: нитрата кадмия (Cd NO_3), сульфата меди (CuSO_4) и сульфата свинца (PbSO_4). Обработка включала четыре повторных измерения концентраций металлов (50, 100, 150 и 250 частей на миллион для каждого металла) для двух типов семян кукурузы.

Проращивание семян: Тест на всхожесть семян проводили в лаборатории при комнатной температуре (30 °С). Во избежание грибкового заражения семена промывали гипохлоритом натрия в течение 5 минут, а затем ополаскивали дистиллированной водой. Семена погружали в дистиллированную воду на 30 минут перед сушкой на воздухе. Семена протирали папиросной бумагой, примерно по 15 семян каждого типа, по четыре дубликата на обработку. Каждую чашку Петри смачивали 10 мл раствора металла, а контроль обрабатывали чистой водой. Планшеты ежедневно контролировали на предмет уровня влажности. Количество проросших семян подсчитывали ежедневно до последнего дня прорастания (10-й день – рис. 1Б).



Рис. 1. Проращивание семян и их выращивание

Процент всхожести семян определяли по формуле:

$$D = \frac{TSG}{TSA} \times 100, \dots\dots\dots(1)$$

где: D= процент всхожести, TSG = общее количество проросших семян, TSA = общее количество собранных семян.

Выращивание семян: Очищенные, высушенные и промаркированные пластиковые горшки разных цветов и размеров были наполнены 1,5 кг почвы. Были определены предварительные свойства образца почвы, такие как 70%-ная электропроводность глины (ЕС, 2,4 Мсм/см), рН 7,2, содержание органического вещества в почве 3,7% и 2,4% азота [20]. Семена были погружены в стакан с водой, чтобы отсортировать здоровые семена и было обнаружено, что мертвые семена всплывают, в то время как здоровые семена оседали на дно стакана с водой. Здоровые семена одинакового размера были посеяны на глубину 3–5 см в верхний слой почвы в горшках. Рассадку регулярно поливали соответствующим раствором тяжелых металлов в течение семи недель.

Измерение параметров роста: длину растений измеряли с помощью линейки каждую неделю, а сухую массу растений измеряли при каждом сборе урожая, выкорчевывая случайные растения как из опытных, так и из контрольных горшков. Относительную скорость роста (RGR) оценивали для сортов каждую неделю до последнего дня роста (табл. 1). RGR определяли с использованием метода Hoffmann & Poorter (2002) [21] по приведенной формуле:

$$RGR = \frac{(\ln W2 - \ln W1)}{(t2 - t1)} \dots\dots\dots (2)$$

где: W1 и W2 - сухая масса растений в моменты времени t1 и t2.

Определение содержания хлорофилла в листьях

Хлорофилл является одной из важнейших молекул, способствующих фотосинтетической активности растений и отвечает за цепь переноса электронов, которая ускоряет фотосинтез. Однако тяжелые металлы ответственны за изменение структуры хлоропластов и вызывают ингибирование системы переноса электронов, влияя на ее биосинтез за счет повышения активности хлорофиллазы и снижения содержания хлорофилла [8, 22]. Концентрацию хлорофилла в листьях наиболее точно измеряют путем экстракции хлорофилла растворителем с последующим измерением *in vitro* с помощью

спектрофотометра. Однако существуют коммерческие оптические методы, которые широко используются для определения относительной концентрации хлорофилла в листьях. В этом эксперименте было собрано около 4 граммов листьев, измельчено пестиком в ступке с 10 мл 80% ацетона, отфильтровано в пробирки и, наконец, проанализировано с помощью спектрофотометра. Спектрофотометрические результаты были рассчитаны с использованием спектрофотометрического уравнения для преобразования значений поглощения в концентрацию хлорофилла [12].

$$\text{Chlorophyll A (mg/g)} = 12.7 (\text{OD663}) - 2.69(\text{OD645}) \times (V / (1000 \times \text{wt.})) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Chlorophyll B (mg/g)} = 22.9 (\text{OD645}) - 4.68(\text{OD663}) \times (V / (1000 \times \text{wt.}))$$

$$\text{Total Chlorophyll (mg/g)} = 20.2 (\text{OD645}) + 8.02(\text{OD663}) \times (V / (1000 \times \text{wt.}))$$

Где, V =объем смеси, wt. =масса образца растения. OD= оптическая плотность.

Определение содержания тяжелых металлов в растениях кукурузы

Образцы 40-дневных растений были случайным образом отобраны из пяти пластиковых горшков, а корни и ветви были отделены. Затем компоненты были разрезаны на мельчайшие фрагменты и подвергнуты процессу сушки при температуре 80 °С в течение двух дней. После этого образцы были сожжены в печи для превращения в пепел. Для смешивания 10 мл концентрированного HNO₃ с 1 г тонко измельченного растительного образца использовали стерильную пробирку для ферментации. После этого образец подвергали нагреванию в течение одного часа на нагревательном блоке, достигая температуры 95 °С. После процесса охлаждения добавляли 5 мл концентрированной H₂SO₄ и подвергали образец нагреванию при температуре 140 °С до тех пор, пока не стали заметны начальные признаки обугливания. Снова добавили 5 миллилитров концентрированной азотной кислоты (HNO₃), затем охладили, а затем нагрели до температуры 180 градусов Цельсия. Материал постепенно обрабатывали HNO₃ до тех пор, пока не стал заметен отчетливый прозрачный или бледно-желтый оттенок. После охлаждения добавляли 1 миллилитр перекиси водорода (H₂O₂) и затем нагревали до температуры 200 °С. Этот процесс повторяли до тех пор, пока коричневые пары не исчезали. После охлаждения добавляли 10 мл деионизированной воды и 0,5 мл концентрированного HNO₃ и нагревали смесь до 200 °С до образования белого дыма. Затем жидкость охлаждали и пропускали через синтетическую фильтровальную бумагу в мерную колбу емкостью 50 мл,

концентрацию которой затем доводили до соответствующей концентрации с помощью неионизированной воды [23]. Полученный раствор затем анализировали с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии, известного как "Quantum Z". Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения R Studio версии 12.0 ANOVA. Уровень значимости корреляции ($p < 0,01$ и $p < 0,05$) между несколькими параметрами и концентрацией металлов представлен на основе коэффициентов корреляции Пирсона. Результаты представлены в виде среднего значения (\pm стандартное отклонение) ($n = 3$).

Результат и обсуждение

Влияние Cd, Cu и Pb на рост растений

Тяжелые металлы считаются основными токсинами окружающей среды, отрицательно влияющими на все живые организмы, включая растения [7]. Токсическое воздействие металлов на различные стороны роста растений обусловлено неправильным усвоением питательных веществ корнями растений, поскольку металлы застревают в корнях и препятствуют всасыванию питательных веществ из почвы [24].

Всхожесть семян: Результаты показали, что оба тестируемых семени выдерживали абиотический металлический стресс, и всхожесть семян снижалась с увеличением концентрации выбранных металлов (рис. 2Б). Обработки Cd, Cu и Pb подавляли прорастание семян кукурузы в зависимости от концентрации. Снижение всхожести семян обоих типов было гораздо более очевидным после обработки 150 ppm Cd и Pb. В самой высокой концентрации (250 частей на миллион) Cd ингибировал прорастание семян в неволе на 50% и прорастание семян в дикой природе на 42,9%, а Pb аналогичным образом подавлял прорастание семян в неволе на 57% и прорастание семян в дикой природе на 42,9%. Самая высокая концентрация Cu предотвращала прорастание семян обоих типов на 40% (табл. 1, 2) [10].

Из результатов можно сделать вывод, что металлы Cd и Pb оказались более устойчивыми к стрессу, чем Cu. Более того, дикорастущие семени показали большую устойчивость к металлическому стрессу, чем семени, выращенные в неволе. Металлы (Pb) и (Cd) снижали токсичность для прорастания семян даже при низких концентрациях; аналогичные результаты были получены при изучении характеристик прорастания семян

[25]. Такое подавление прорастания семян может быть связано с воздействием металлов на ферменты, необходимые для прорастания семян (амилазу и протеазу). Подобный аргумент также приводится Rah et al. (2019) [26]. Dmitry I. et al. (2017) [10] также задокументировали, что ингибирование гибберелловой кислоты и активация абсцизовой кислоты при прорастании у других сосудистых растений были обусловлены металлами Pb и Cd.

Высота растений: Cd и Pb оказывают более неблагоприятное воздействие на высоту растений, чем Cu. Тем не менее, оба типа семян показали заметное снижение высоты с увеличением концентрации (рис. 2А). Высота растений значительно снижалась при более высоких концентрациях металлов (250 частей на миллион) для каждого металла по сравнению с контрольными растениями. Наибольшее снижение высоты растений наблюдалось в группе Pb (36,2%), Cd (24,8%) и Cu (9,7%) для растений, выращиваемых из семян в неволе. Аналогичная тенденция наблюдалась и для дикорастущих семян растений, которые содержат Pb (46,7%), Cd (28%) и Cu (13%). Однако оба сорта были наименее подвержены воздействию Cd и Pb при концентрации до 100 частей на миллион, но дополнительная концентрация Cu в 150 частей на миллион по-прежнему не влияла на высоту растений, что свидетельствует о том, что Cu является важным минералом для роста растений. Результат был признан статистически значимым (значение t равно -11,36066). Значение $p < 0,00001$. *Результат является значимым при $p < 0,05$.*

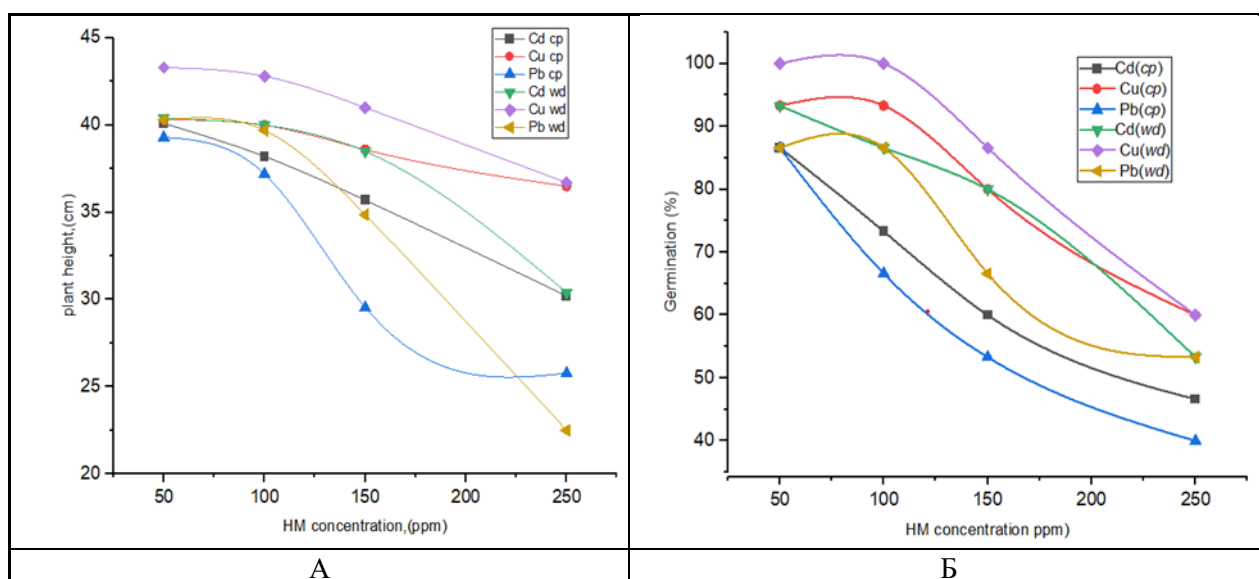


Рис. 2. (А) Высота экспериментальных растений (Б) всхожесть семян на фоне увеличения концентрации тяжелых металлов

Примечание: Ср= неволе семя, Wd= Дикое семя.

**Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»**

Таблица 1. Особенности роста семян в неволе

Param.	Cont.	Cd				Cu				Pb			
		50	100	150	250	50	100	150	250	50	100	150	250
G (%)	93.3	86.6	73.3	60.0	46.6	93.3	93.3	80.0	60.0	86.6	66.6	53.3	40.0
\bar{x} , Ph	40.4±0.71	40.1±0.21	38.2±0.31	35.7±0.40	30.2±0.22	40.3±0.07	40±0.80	38.6±0.33	36.5±0.21	39.3±0.21	37.2±0.32	29.5±0.25	25.8±0.06
\bar{x} , Fw	32.6±0.02	32.4±0.32	30.7±0.06	28.4±0.45	23.5±0.14	33.9±0.19	32.6±0.71	31.5±0.14	29.6±0.12	30.8±0.35	27.8±0.22	22.1±0.06	16.9±0.61
\bar{x} , Dw	13.0±0.22	13±0.91	11.5±0.24	10.4±0.14	9.0±0.08	12.2±0.15	10.2±0.63	8.9±0.08	7.8±0.16	12.0±0.07	10.7±0.09	9.8±0.31	6.8±0.08
RGR	0.66	0.61	0.45	0.39	0.32	0.60	0.58	0.36	0.28	0.48	0.35	0.29	0.09
TLCh	23.5±0.42	19.2±0.82	19.0±0.07	18.2±0.33	18.6±0.81	23.0±0.28	23.4±0.44	22.3±0.00	19.8±0.07	18.7±0.13	18.2±0.20	16.2±0.05	16.9±0.14

Таблица 2. Характеристики роста дикорастущих семян

Param.	Cont.	Cd				Cu				Pb			
		50	100	150	250	50	100	150	250	50	100	150	250
G (%)	100	93.3	86.6	80.0	53.3	100	100	86.6	60.0	86.6	86.6	66.6	53.3
\bar{x} , Ph	42.2±0.81	40.4±0.65	40.0±0.41	38.5±0.78	30.4±0.021	43.3±0.29	42.8±0.17	41.0±0.22	36.7±0.24	40.3±0.18	39.7±0.02	34.9±0.15	22.5±0.44
\bar{x} , Fw	46.2±0.06	45.8±0.24	45.5±0.24	43.7±0.06	41.4±0.07	40.4±0.17	45.9±0.25	44.8±0.05	42.6±0.31	39.5±0.44	38.4±0.34	32.7±0.02	24.4±0.21
\bar{x} , Dw	16.5±0.03	16.3±0.09	14.8±0.08	11.2±0.16	9.2±0.54	17.5±0.08	16.8±0.71	14±0.33	12.8±0.23	12.1±0.16	12±0.09	8.5±0.14	6.4±0.03
RGR	0.64	0.60	0.50	0.40	0.34	0.62	0.64	0.47	0.44	0.47	0.41	0.3	0.13
TLCh	24.5±0.25	24.3±0.33	22.8±0.51	23.1±0.04	19.4±0.12	25.2±0.21	24.8±0.05	24.3±0.09	23.7±0.04	23.2±0.04	24.5±0.05	20.3±0.00	20.5±0.31

Примечание: G= всхожесть, Ph = высота растения (см), Fw = масса в свежем виде (г), DW = масса в сухом виде (г), RGR = относительная скорость роста (г/сут-1), TLCh = общее количество хлорофилла в листьях (мг/г).

Растительная биомасса: согласно таблице 1, масса растений в свежем и сухом виде сильно снижалась по градиенту концентрации металлов; при максимальной концентрации (250 частей на миллион каждого металла) наблюдалось снижение массы растений в свежем виде: Cd (10,4% wd, 28% ср), Cu (7,8% wd, 0,00% ср), и Pb (47,2% wd, 48,0% ср). Аналогичный эффект наблюдался для сухой массы растений. Однако токсичность металлического свинца была заметно выше, чем у других металлов (Cd и Cu) для обоих сортов растений. На биомассу двух видов растений это повлияло незначительно или не повлияло вовсе, несмотря на высокое содержание Cu в растительной среде, кроме того, было обнаружено, что Cu усиливает рост растений, при этом до 100 частей на миллион масса растения в свежем виде была даже выше, чем у контрольного растения, что указывает на то, что Cu необходим для роста растений. Токсичность Cd была распространена на растениях кукурузы, выращенных в неволе, и, вероятно, растение из дикорастущих семян было немного терпимее, чем в неволе.

Относительная скорость роста (RGR): как показано на рис. 3. (ниже), RGR (г/сут.) снижалась вместе с увеличением концентрации экспериментальных металлов (процентное снижение увеличивалось). Например, при Cd (50 ppm) RGR снизился только на 6,25% и 7,58% для дикорастущего и выращиваемого в неволе растений кукурузы соответственно, но при Cd (250 частей на миллион) RGR снизился на 46,88% и 51,52% соответственно для дикорастущего и выращиваемого в неволе растений. Аналогичным образом, при начальной концентрации Pb (50 частей на миллион) снижение RR составило 26,56% и 27,27% для дикорастущего и выращиваемого в неволе растений кукурузы соответственно, но при концентрации Pb (250 частей на миллион) RR соответственно снизился на 79,69% для дикорастущего типа и на 86,36% для выращиваемого в неволе. Начальные концентрации меди Cu (50–100 частей на миллион) не показали существенного влияния на концентрацию меди в растениях обоих типов, но при максимальной концентрации меди Cu (250 частей на миллион) концентрация меди в растениях, выращенных в дикой природе, снизилась на 31,25% и 57,58% соответственно. Тенденция к снижению RGR и сухого вещества растений убедительно свидетельствовала о том, что накопление метаболитов/фотосинтетических продуктов в период между уборками урожая было вызвано стрессом из-за металлов [8]. Кроме того, было обнаружено, что растения

кукурузы, выращенные из обычных семян, более уязвимы к повышенной концентрации металлов, чем растения кукурузы, выращенные из семян дикорастущего типа. Тем не менее, обработка металлом выявила повышенную токсичность металла при позднем сборе урожая, возможно, это произошло из-за того, что у растения было достаточно корневых волосков, чтобы поглощать избыточное количество металла, которое перемещалось бы в другие части растения и влияло бы на метаболические реакции растительной системы.

Рост растений обусловлен, главным образом, особенностями листьев и фотосинтетической активностью растений. Металлы (Cd и Pb) являются хорошо известными абиотическими факторами стресса, которые подавляют фотосинтетическую активность интактных растений и, в конечном итоге, влияют на рост растений и урожай биомассы. Измененные значения RGR также предсказывали ухудшение роста растений. Лист является важным фотосинтетическим органом растений, который играет ключевую роль в росте растений. Pb и Cd отрицательно влияют на рост и развитие листьев “*Pisum sativum*” и “*Zea mays*”.

Исследования показали ингибирующую роль тяжелых металлов в росте и развитии листьев растений посредством возникновения окислительного стресса/АФК [26, 27]. Результаты настоящего исследования показали, что содержание хлорофилла в тестируемых растениях кукурузы снижалось при воздействии 250 частей на миллион Cd и Pb, что снижало содержание хлорофилла на 20,8% и 16% соответственно. Для меди снижение содержания хлорофилла не было статистически значимым ($P > 0,05$).

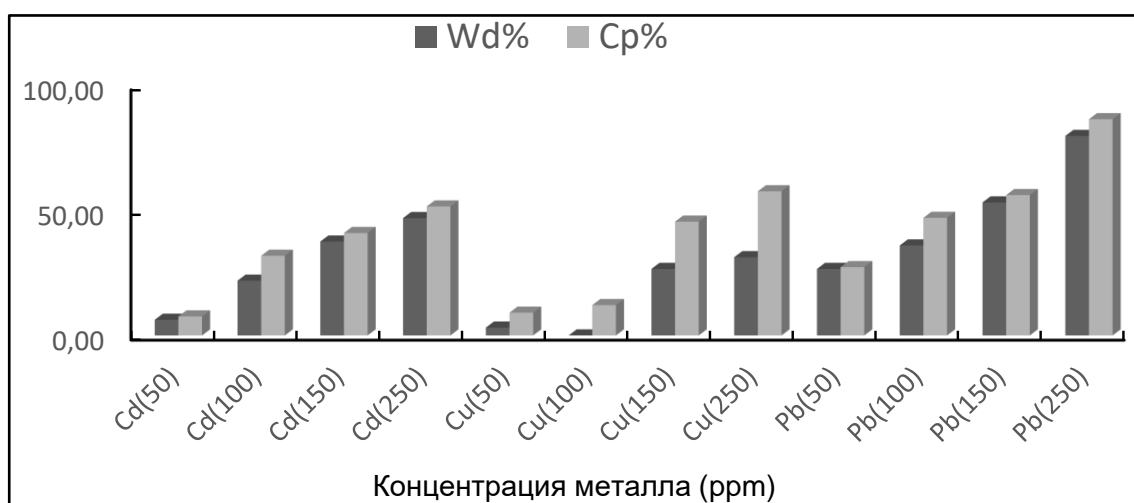


Рис. 3. Процентное снижение RGR у дикорастущего (wd) и выращиваемого в неволе (Cr) растений кукурузы

Поглощение тяжелых металлов: как показано в таблице 3 ниже, растение кукурузы усвоило значительное количество тяжелых металлов своими органами. За первые 15 дней в корневой части растения накапливалось $74,91 \pm 2,39$ мг/кг меди, $1,62 \pm 0,199$ мг/кг Cd, $55,11 \pm 2,31$ мг/кг Pb, а содержание тяжелых металлов в побеговой части растения было ($86,88 \pm 2,85$, $2,69 \pm 0,03$, $83,54 \pm 2,73$) мг/кг Cd, Cu и Pb соответственно. Результаты также показали, что на поздних стадиях роста растения наблюдалось постепенное снижение концентрации тяжелых металлов для выбранных экспериментальных металлов, за исключением Cd. Это наблюдение, вероятно, можно объяснить тем фактом, что на поздней стадии развития растения полностью вырабатывают механизмы, предотвращающие чрезмерное поглощение тяжелых металлов. Но некоторые металлы обладают высокой подвижностью, растворимы и легкодоступны (биологически доступны), например, Cd, который может преодолевать барьеры автоматической защиты растений и обеспечивать их избыточное содержание в тканях, такая сопоставимая картина была также продемонстрирована *Alina Kabata-Pendias (2007) [28]*.

Таблица 3 Накопление тяжелых металлов растениями кукурузы в почве, загрязненной металлами (в мг/кг)

	Cu			Cd			Pb		
	\bar{x}	Станд.	%	\bar{x}	Станд.	%	\bar{x}	Станд.	%
UsHmc	127	6.45	5.08	4.32	0.441	10.21	117.00	12.11	10.35
TsHmc	89.1	2.25	2.53	2.31	0.434	18.79	57.18	5.98	10.44
RHmc. ₁₅	74.91	2.39	3.15	1.62	0.199	12.30	55.11	2.31	4.19
SHmc. ₁₅	86.88	2.85	6.64	2.69	0.03	1.93	83.54	2.73	6.56
RHmc. ₄₀	57.18	5.97	10.44	1.21	0.017	1.44	43.30	1.20	2.77
SHmc. ₄₀	67.97	4.24	13.52	5.73	0.30	11.19	61.81	7.28	25.36

Примечание: Usmc = Содержание тяжелых металлов в необработанной почве, Themes= Содержание тяжелых металлов в обработанной почве, RHmc = Содержание тяжелых металлов в корнях, ShMC= Содержание тяжелых металлов в побегах. Индексы 15 и 40 обозначают количество дней.

Вывод

Воздействие тяжелых металлов на рост, развитие и продуктивность растений, вызванное стрессом, стало серьезной проблемой в последние пару десятилетий. В нашем эксперименте мы выбрали тяжелые металлы, которые были токсичны для прорастания семян, высоты растений, развития листьев, биомассы растений и содержания хлорофилла. Более того, значения RGR у обоих растений кукурузы также указывали на подавляющую

роль Cd и Pb в почвенной среде. Механизм роста растений, на который повлияли изменения в почве, показал свое сходство с характеристиками почвы, подверженной воздействию металлов, которое было намного сильнее при более высоких концентрациях металлов. Данные показали, что тяжелые металлы оказывают кислое воздействие на почву и влияют на почвенное дыхание, влияя на микробиологическую активность почвы. Аналогичным образом, снижение уровня почвенных ферментов выявило влияние на разложение содержащихся в почве SOM и рециркуляцию питательных веществ в почве. Однако, помимо токсического воздействия металлов, растения кукурузы, как полагают, обладают большим потенциалом для накопления тяжелых металлов. Как показал эксперимент, можно предположить, что кукуруза *Zea* может быть использована в качестве средства фиторемедиации на загрязненных сельскохозяйственных почвах. Однако такие зараженные растения кукурузы также небезопасны для употребления в пищу из-за превышения допустимых концентраций тяжелых металлов. В целом, стресс растений от воздействия металлов имеет сложную природу и с ним довольно трудно справиться в полевых условиях. Таким образом, развитие глубоких знаний и технологий для использования биотехнологических подходов обеспечит важные перспективы для улучшения урожайности сельскохозяйственных культур в условиях воздействия тяжелых металлов.

Мы выражаем нашу благодарность Астраханскому государственному университету имени В.Н. Татищева за предоставление расходных материалов и одноразовых лабораторных принадлежностей.

Список использованных источников:

1. Haider F.U. et al. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* Elsevier Inc., 2021. Vol. 211. P. 111887.
2. Abedi T., Gavanji S., Mojiri A. Lead and Zinc Uptake and Toxicity in Maize and Their Management // *Plants*. 2022. Vol. 11, № 15. P. 1–17.
3. Shafique F. et al. Heavy metal toxicity and its physio-biochemical effects on maize (*Zea mays* L.) // *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* 2020. Vol. 21, № 45–46. P. 94–102.
4. Adekiya A.O. et al. Heavy metal composition of maize and tomato grown on contaminated soils // *Open Agric.* 2018. Vol. 3, № 1. P. 414–426.
5. Arnold Gt.L. et al. Removal of heavy metals from a contaminated soil using phytoremediation // *MATEC Web Conf.* 2020. Vol. 305. P. 00061.

6. Kidane T.M., Sukhenko L. Study of the degree of metal accumulation and toxicity of corn plants grown on heavy metals contaminated (artificially) soil // E3S Web Conf. 2023. Vol. 392.
7. Ashraf A. et al. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils // Ecotoxicol. Environ. Saf. Elsevier Inc., 2019. Vol. 174, № November 2018. P. 714–727.
8. Atta M.I. et al. Assessing the effect of heavy metals on maize (*Zea mays* L.) growth and soil characteristics: plants-implications for phytoremediation // PeerJ. 2023. Vol. 11. P. 1–25.
9. Hasanuzzaman M. et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator // Antioxidants. 2020. Vol. 9, № 8. P. 1–52.
10. Bashmakov D.I. et al. Lead accumulation and distribution in maize seedlings: Relevance to biomass production and metal phytoextraction // Int. J. Phytoremediation. 2017. Vol. 19, № 11. P. 1059–1064.
11. Fasani E. et al. The potential of genetic engineering of plants for the remediation of soils contaminated with heavy metals // Plant Cell Environ. 2018. Vol. 41, № 5. P. 1201–1232.
12. Syed R., Kapoor D., Bhat A.A. Heavy metal toxicity in plants: A review // Plant Arch. 2018. Vol. 18, № 2. P. 1229–1238.
13. Figlioli F. et al. Overall plant responses to Cd and Pb metal stress in maize: Growth pattern, ultrastructure, and photosynthetic activity // Environ. Sci. Pollut. Res. Environmental Science and Pollution Research, 2019. Vol. 26, № 2. P. 1781–1790.
14. Fulekar M.H. et al. Microbial bioremediation of heavy metals // Geomicrobiol. J. Taylor & Francis, 2023. Vol. 11, № 2. P. 103–115.
15. Gautam P.K. et al. Heavy metals in the environment: Fate, transport, toxicity and remediation technologies // Heavy Met. Sources, Toxic. Remediat. Tech. 2016. № February. P. 101–130.
16. Arora N.K. Bioremediation: a green approach for restoration of polluted ecosystems // Environ. Sustain. Springer Science and Business Media LLC, 2018. Vol. 1, № 4. P. 305–307.
17. Mohapatra R.K. et al. Native soil bacteria: Potential agent for bioremediation // Soil Microenviron. Bioremediation Polym. Prod. 2019. P. 17–34.
18. Mocquot B. et al. Copper toxicity in young maize (*Zea mays* L.) plants: Effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities // Plant Soil. 1996. Vol. 182, № 2. P. 287–300.
19. Singh A., Prasad S.M., Singh R.P. Plant responses to xenobiotics // Plant Responses to Xenobiotics. 2016. P. 1–346.
20. Vareda J.P., Valente A.J.M., Durães L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review // J. Environ. Manage. Elsevier, 2019. Vol. 246, № June. P. 101–118.
21. Hoffmann W.A., Poorter H. Avoiding bias in calculations of relative growth rate //

Ann. Bot. 2002. Vol. 90, № 1. P. 37–42.

22. Hoang H.G. et al. Human health risk simulation and assessment of heavy metal contamination in a river affected by industrial activities // Environ. Pollut. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 285.

23. Oziegbe O. et al. Assessment of heavy metal bioremediation potential of bacterial isolates from landfill soils // Saudi J. Biol. Sci. The Author(s), 2021. Vol. 28, № 7. P. 3948–3956.

24. Sharma N. et al. Heavy metal pollution: Insights into chromium eco-toxicity and recent advancement in its remediation // Environ. Nanotechnology, Monit. Manag. Elsevier B.V., 2021. Vol. 15.

25. Sayyadian K. et al. Effect of biochar on cadmium, nickel and lead uptake and translocation in maize irrigated with heavy metal contaminated water // Appl. Ecol. Environ. Res. 2019. Vol. 17, № 1. P. 969–982.

26. Rah Z., Singh V.P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview // Environ. Monit. Assess. 2019. Vol. 191, № 7.

27. Sodhi K.K. et al. Perspective on the heavy metal pollution and recent remediation strategies // Curr. Res. Microb. Sci. Elsevier B.V., 2022. Vol. 3, № September. P. 100166.

28. Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B. Part II Biogeochemistry of Trace Elements // Springer. 2007. 561 p.

Цитирование:

Тсегай М.К., Сухенко Л.Т. Влияние тяжелых металлов (Cd, Cu и Pb) на параметры роста растений и фиторемедиационную способность кукурузы [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/2/st_233.pdf
DOI: <https://doi.org/10.51419/202142233>.