

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

УДК 631.453:632.122

**Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и
нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из
загрязненных почв с использованием горчицы сарептской**

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева

Аннотация

*В работе приведены результаты исследований по изучению влияния хелатирующих агентов на фитоэкстракцию растениями горчицы свинца из загрязненных дерново-подзолистых почв. В вегетационном опыте с загрязнением пахотного горизонта почвы на уровне 3 ОДК (390 мг/ кг почвы Pb (CH₃COO)₂·3H₂O) и применением лимонной кислоты (в концентрации 60 ммоль/ кг почвы) и нитрилотриуксусной кислоты (в концентрации 5 ммоль/ кг почвы) рассматривается накопление свинца в разных частях растений горчицы и оценивается роль этих хелатов на рост и накопление биомассы растений горчицы сарептской (*Brassica juncea* L.). Результаты исследований показали, что при таком уровне загрязнения дерново-подзолистых почв свинцом происходит снижение длины корней на 0,35 см, побегов на 9,5 см, и уменьшение сухой массы корней на 33% и побегов на 15% – по сравнению с контролем. В случае обработки загрязнённой почвы лимонной кислотой наблюдается увеличение длины корней на 14% и сухой массы корней на 20% с уменьшением длины побегов на 14%. При обработке нитрилотриуксусной кислотой – повышение длины побегов на 20% и корней на 2%, сухой массы побегов – на 9%, и корней – на 30%. В случае совместной обработки двумя кислотами длина корней увеличивается наиболее заметно – на 35%. Концентрация свинца достоверно увеличивалась при применении лимонной кислоты: в 2,4 раза – в корнях, в 2,1 раза – в стеблях и в 4,1 раза – в листьях. Содержание в растениях горчицы свинца при применении нитрилотриуксусной кислоты возросло гораздо в меньшей степени: на 5% – в корнях, на 40 % – в листьях, и даже уменьшалось на 30% в стеблях. В наибольшей степени повысило содержание свинца в растениях горчицы совместное применение лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты: почти в 4,0 раза – в корнях, в 0,4 раза – в стеблях, и в 4,1 раза – в листьях (по отношению к контролю – почва, загрязнённая свинцом без добавления кислоты).*

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

Ключевые слова: ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА, ЛИМОННАЯ КИСЛОТА, НИТРИЛОТРИУКСУСНАЯ КИСЛОТА, СВИНЕЦ, ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ, ПОЧВА, ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ, ЭКОЛОГИЯ ПОЧВ, ХЕЛАТЫ, ГОРЧИЦА САРЕПТСКАЯ

Введение

Загрязнение почв тяжёлыми металлами относится к наиболее актуальным экологическим проблемам современности и несёт серьезную угрозу здоровью человека [1]. Потенциально тяжёлые металлы могут негативно влиять на микробные популяции почв, что приводит к снижению их биологической активности. Кроме того, было показано, что поглощение и накопление тяжелых металлов подавляет рост растений [2]. Влияние тяжёлых металлов на окружающую среду представляет собой повышенную опасность, поскольку в отличие от органических загрязнителей, тяжёлые металлы не подвергаются разрушению, а переходят из одной формы в другую и могут интегрироваться в структуру различных соединений: таких как соли, оксиды и металлоорганические вещества. Это свойство делает их долговечными и устойчивыми, что усиливает их воздействие на окружающую среду [3].

Свинец признан одним из самых опасных загрязнителей среди тяжелых металлов [4, 5]. Он надежно фиксируется в почве, в основном за счет формирования специфических комплексов, которые связаны с органическими веществами, а также может относительно легко аккумулироваться в биологических тканях [6, 7]. Свинец оказывает значительное воздействие на рост и развитие растений. В основном, он накапливается в их корнях. В присутствии высоких концентраций свинца в почве происходит выраженное ингибирование процессов роста и развития растения, а также может происходить нарушение фотосинтеза. Важно отметить, что разные сельскохозяйственные растения отличаются специфичностью в отношении аккумуляции тяжёлых металлов. Например, из зернобобовых культур горох и фасоль наиболее устойчивы к проникновению соединений свинца [8-10].

Свинец попадает в почву из нескольких источников. К ним относятся историческое использование этилированного бензина, плавка и добыча полезных ископаемых, а также наличие примесей в пестицидах и химических удобрениях, производство хрусталя, эмалей, замазок, лаков, красок, спичек и пиротехнических изделий. Накопление свинца в почвах негативно влияет на качество сельскохозяйственных продуктов и приводит к возникновению

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

различных заболеваний при проникновении ионов Pb^{2+} в организм человека [11, 12]. Неврологические нарушения наблюдались у детей, которые подвергались воздействию уровня свинца в крови 10 мг/л. Это подчеркивает значительные риски для здоровья, связанные даже с минимальными уровнями воздействия свинца [13].

Традиционно к технологиям рекультивации загрязнённых тяжёлыми металлами и, в частности, свинцом почв относят: замену загрязнённой почвы; процессы термической десорбции тяжёлых металлов; методы иммобилизации тяжёлых металлов; промывки загрязнённой почвы [14]. Замена загрязнённой почвы и процессы термической десорбции тяжёлых металлов имеют ряд недостатков: 1) высокая стоимость – некоторые из этих методов могут быть дорогостоящими, особенно если рассматривать большие площади загрязнения; 2) технические сложности – некоторые методы требуют сложного оборудования и технических знаний для их выполнения [15]. В связи с этим, все больше внимания уделяется разработке и применению биологических методов ремедиации, прежде всего – фиторемедиация, поскольку они более экологически чистые, экономически выгодные, менее трудозатратные и не требуют использования сложного технического оборудования.

Термин “фиторемедиация” происходит от сочетания греческого слова “phyto” (растение) и латинского слова “remedium” (очистка) [16]. Фиторемедиация – это «зеленый» подход и устойчивый способ рекультивации почвы, она является лучшим подходом к работе с почвами с низким и средним уровнем загрязнения тяжелыми металлами и может применяться в сочетании с другими традиционными подходами к восстановлению почвы для эффективного удаления загрязняющих веществ [14].

Из методов фиторемедиации для очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами, наиболее широко принимается метод фитоэкстракция, который предполагает использование растений-аккумуляторов для удаления загрязняющих веществ из почвы с помощью системы "почва-корень-побег" [17]. Этот процесс основан на использовании быстрорастущих растений с развитой корневой системой, устойчивостью к токсичности тяжелых металлов и с большой биомассой [18, 19].

В последние десятилетия для достижения лучшего результата по извлечению тяжёлых металлов используются хелатирующие агенты, которые способствуют повышению

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

биодоступности тяжелых металлов в почве и увеличению способности растений к их адсорбции [20]. Среди наиболее популярных хелатирующих агентов, которые способствуют поглощению тяжелых металлов растениями, следует отметить нитрилотриуксусную кислоту, этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА) и низкомолекулярные органические кислоты [21, 22].

Одним из главных преимуществ использования нитрилотриуксусной кислоты в фитоэкстракции является ее более быстрое биоразложение в почве по сравнению с ЭДТА, которая не поддается биодegradации [23]. В почвах нитрилотриуксусная кислота легко разлагается, главным образом, микроорганизмами в аэробных условиях, с периодом полуразложения от 3 до 7 дней [24]. Кроме того, использование нитрилотриуксусной кислоты более перспективно в виду её меньшей токсичности для микроорганизмов и растений [25].

Было показано, что на почве, загрязнённой свинцом в концентрации 3500 мг/кг, при добавлении нитрилотриуксусной кислоты в концентрации 10 mM концентрация свинца в корнях повышалась на 19%, в побегах – на 109% и в листьях – на 57% [26].

Лимонная кислота (С₆H₈O₇) – природная низкомолекулярная органическая кислота, которая эффективно используется для усиления фитоэкстракции Pb [27, 28]. Она способствует незначительному подкислению реакции среды, приближая её к оптимальным значениям pH для максимальной подвижности Pb в диапазоне от 4,0 до 4,5 [28]. Одним из достоинств лимонной кислоты является ее быстрое разложение в почве: период полуразложения варьирует от 1,5 до 5,7 дней [29]. Было обнаружено, что лимонная кислота в концентрации 60 mM более эффективна, чем этилендиаминтетрауксусная кислота в концентрации 5 mM и нитрилотриуксусная кислота (5 mM), для увеличения фитоэкстракции свинца клещевиной (*Ricinus vcommunis* L.) и цикорием (*Cichorium intybus* L.) [30].

Целью нашего исследования является оценка эффективности фитоэкстракции свинца с использованием горчицы сарептской, лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты (по отдельности и вместе) из загрязнённых свинцом дерново-подзолистых почв.

Объекты и методы

Объектом исследования является горчица сарептская (*Brássica júncea*) из семейства

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

Brassicaceae, которая широко применяется в качестве фиторемедиатора из-за своей высокой способности к накоплению тяжелых металлов [31]. В рамках нашего исследования мы провели вегетационный опыт с дерново-подзолистой среднесуглинистой почвой, отобранной на Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, в вегетационном домике кафедры агрономической, биологической химии и радиологии.

Исследуемая почва характеризуется близкой к нейтральной реакцией среды: рН (КСl) – 5,93 (определено согласно ГОСТ 26483), рН (H₂O) – 7,25 (определено согласно ГОСТ 26423). Содержание гумуса – низкое: 1,84% (определено по Тюрину согласно ГОСТ 26213-91), что характерно для старопахотных дерново-подзолистых почв. Содержание минерального азота также низкое: аммонийного азота – 22,2 мг/кг (определено согласно ГОСТ 26489), нитратного азота – 12,5 мг/кг (определено согласно ГОСТ 26951). Содержание определённых по Кирсанову (согласно МИ-П-01-2023) подвижных форм фосфора – среднее (100,81 мг/кг), калия – повышенное (160,82 мг/кг). Сумма обменных оснований (29,2 мг-экв/100 г – определено согласно ГОСТ 27821-2020) и ёмкость почвенного поглощающего комплекса (29,77 мг-экв/100 г – определено согласно ГОСТ 17.4.4.01-84) – относительно высокие для дерново-подзолистых почв. Содержание подвижного свинца (1,24 мг/кг – определено согласно РД 52.18.289-90) и валовое содержание свинца (18,54 мг/кг – определено согласно М-МВИ-80-2008) – относительно низкие.

При набивке сосудов почвой в неё добавлялись фоновое для данного опыта количество удобрения, внесенного в виде нитроаммофоски с равным содержанием основных элементов питания N, P, K в соотношении 16:16:16. Схема опыта включала пять вариантов (табл. 1), расположение вариантов – рендомизированное, повторность опыта – трёхкратная, общее количество сосудов: 5 x 3 = 15. Масса абсолютно сухой почвы в каждом сосуде составляла 5 кг.

Загрязнение почвы свинцом имитировали путем внесения в нее уксуснокислого свинца в концентрации 3 ОДК (390 мг/ кг почвы). В фазе цветения растения срезали вручную, и за 7 дней до этого в почву вносили растворы лимонной кислоты и/или нитрилотриуксусной кислоты в дозах 60 ммоль/ кг почвы и 5 ммоль/ кг почвы, соответственно. Согласно принятой методике вегетационных опытов [32] проводился ежедневный полив до появления первой капли фильтрата из дна сосуда.

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

Таблица 1. Схема вегетационного опыта с дерново-подзолистой почвой, загрязненной свинцом, с использованием горчицы сарептской в 2022 г.

Варианты	Pb 3 ОДК *	СА 60 **	НТА 5 ***
А (Фон)	-	-	-
В (Pb 3 ОДК)	+	-	-
С (Pb+СА60)	+	+	-
Д (Pb+НТА5)	+	-	+
Е (Pb+СА60+НТА5)	+	+	+

Примечание: * Pb 3 ОДК – внесение свинца Pb (CH₃COO)₂·3H₂O в дозе 390 мг/ кг почвы; ** СА 60 – внесение лимонной кислоты в дозе 60 ммоль/ кг почвы; *** НТА 5 – внесение нитрилотриуксусной кислоты в дозе 5 ммоль/ кг почвы.

По данным расположенной на территории РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева Метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона (табл. 2), вегетационный период проводимого в 2022 г. исследования был несколько теплее среднемноголетних показателей за последние 11 лет: средняя температура воздуха в июне была выше среднемноголетней на 0,7°С, в июле – на 0,9°С.

Таблица 2. Температура воздуха вегетационного периода в месяцы проведения эксперимента (по данным Метеорологической обсерватории имени В.А. Михельсона).

Месяц	Декада	Средняя месячная температура воздуха (°С)	Средняя декадная температура воздуха (°С)		Средняя месячная температура воздуха (°С)
		2012–2022	2012–2022	2022 г.	2022 г.
Июнь	I	18.1	16.6	17.8	18.8
	II		18.1	17.9	
	III		19.5	20.6	
Июль	I	19.7	19.7	21.7	20.6
	II		19.6	19.2	
	III		19.9	21.0	

В условиях повышенной в среднем на 0,7 - 0,9°С температуры воздуха в период проведения опыта при отсутствии, на фоне периодического полива, дефицита влаги развитие горчицы проходило быстрее, чем в полевых условиях, и она за 35 дней дошла до цветения с последующей уборкой. После уборки горчицы в стадии цветения в каждом сосуде проводилось измерение длины корней и побегов, после чего их высушивали, взвешивали и размалывали для проведения химических анализов.

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилтриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Результаты и обсуждение

По результатам биометрических наблюдений в варианте опыта с загрязнением почвы свинцом (В на рис.1.А) наблюдается существенное сокращение, по сравнению с фоном (А на рис.1.А), длины побега: в среднем – на 9,5 см, при значительном пространственном варьировании.

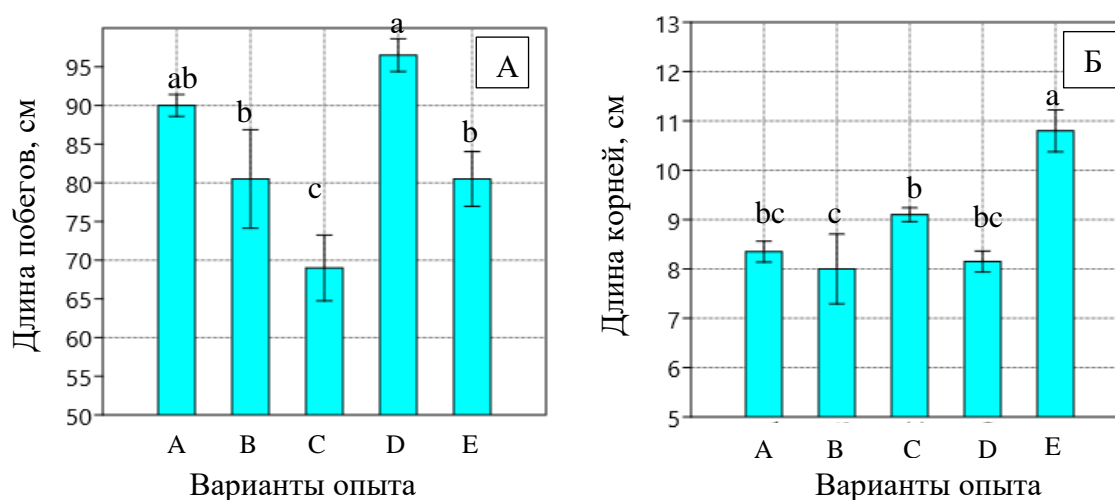


Рис. 1. Влияние нитрилтриуксусной кислоты и лимонной кислоты на длину побегов (А) и корней (Б) горчицы сарептской в вариантах опыта с загрязнением дерново-подзолистой почвы свинцом (условные обозначения см. табл. 1).

Достоверность различий вариантов a, b, c, ab подтверждается при уровне ($P < 0,05$).

Важно отметить, что в варианте с добавлением к загрязнённой почве лимонной кислоты (С на рис. 1.А) наблюдалось ещё более резкое снижение длины побега: на 11,5 см – и это отличие достоверно как от фона, так и от варианта со свинцом. В варианте с добавлением к загрязнённой почве нитрилтриуксусной кислоты (D на рис. 1.А) видим обратное: достоверно увеличение длины побега, в среднем, на 16 см – при относительно незначительном варьировании между повторностями, по сравнению с вариантом В. Вариант совместного применения двух кислот показал результаты, близкие варианту с загрязнением свинцом без применения кислот, но при сокращении диапазона варьирования длины стебля на 55%.

Изменения длины корней, как правило, были значительно меньше, чем стебля – при

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилтриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

отсутствии достоверных различий между вариантами А и D (рис. 1.Б). При этом, вариант с загрязнением свинцом (В), как и в случае биометрии побега, характеризовался наиболее высоким варьированием между повторностями. В варианте с применением лимонной кислоты (С на рис. 1.Б) наблюдается достоверное увеличение длины корней: в среднем, на 1,1 см – при относительно незначительном варьировании между повторностями, по сравнению с вариантом В. В варианте с применением нитрилтриуксусной кислоты (D на рис. 1.Б) наблюдается несущественное увеличение длины корней: в среднем – на 2% по сравнению с вариантом В, при относительно незначительном варьировании между повторностями. В случае совместного применения двух кислот (вариант Е) различия с контрольным вариантом и вариантом загрязнения почвы свинцом достигли почти полуторакратного увеличения.

По данным измерения биомассы в варианте опыта с загрязнением почвы свинцом (В на рис. 2.Б) наблюдалось существенное снижение массы побегов: в среднем – на 1,9 г, по сравнению с контрольным вариантом, при значительном пространственном варьировании между повторностями.

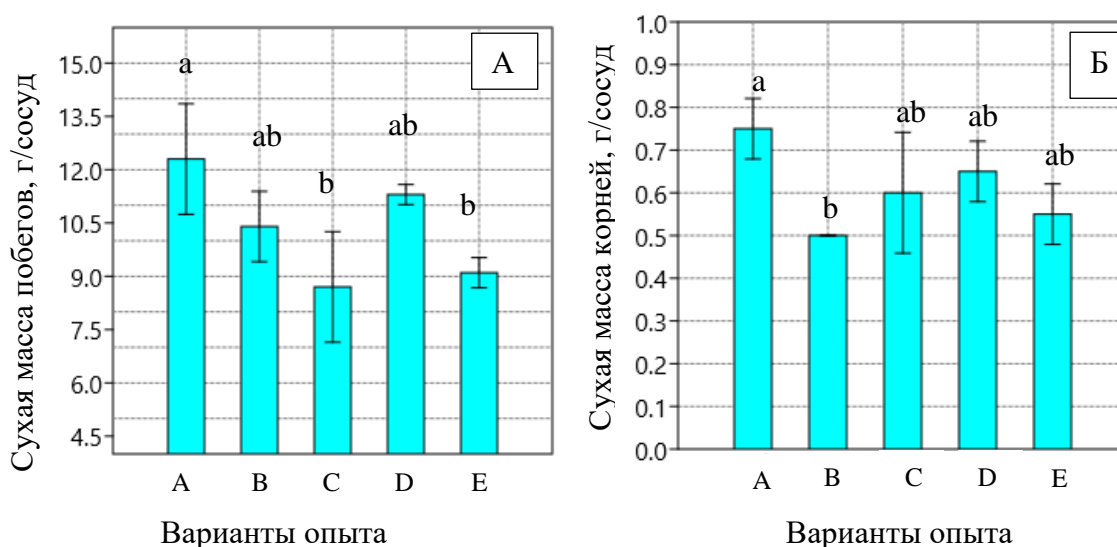


Рис. 2. Влияние нитрилтриуксусной кислоты и лимонной кислоты на сухую массу побегов (А) и корней (Б) горчицы сарептской в вариантах опыта с загрязнением дерново-подзолистой почвы свинцом (условные обозначения см. табл. 1).

Примечание: Достоверность различий вариантов а, b, с, ab подтверждается при уровне ($P < 0,05$).

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитозэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

При применении лимонной кислоты (С на рис. 2.А) отмечается дальнейшее снижение массы побегов по сравнению с вариантом В: в среднем, на 1,7 г – что статистически недостоверно на фоне повышенного варьирования между повторностями. При применении нитрилотриуксусной кислоты (D на рис. 2.А) наблюдается биомасса ниже варианта незагрязнённой почвы, но выше варианта с загрязнением почвы свинцом – в среднем, на 0,9 г. Следует отметить, что совместное применение двух кислот даёт снижение массы побегов: в среднем – на 13%, по сравнению с вариантом В. Возможно, лимитирующим экологическим фактором развития растений является поступление в них значительного количество свинца, которое заметно увеличивается в случае применения лимонной кислоты и совместного применения двух кислот.

Биометрический анализ биомассы корней показывает аналогичные изменения биомассы побегов в варианте с загрязнением свинцом (В на рис. 2.Б) – по сравнению с контролем, и они носят достоверный характер на фоне незначительного варьирования между вариантами. В то же время, применение лимонной кислоты (С на рис. 2.Б) существенно увеличивало биомассу корней – в среднем, на 20% по сравнению с вариантом В, при значительном пространственном варьирования. Аналогично ведёт себя вторая кислота, но при меньшем диапазоне варьирования (D на рис. 2.Б). В случае добавление двух кислот (Е на рис. 2.Б) наблюдается значительное повышение биомассы корней – в среднем, на 10% по сравнению с вариантом В, при наличии достоверных различий с контролем (А на рис. 2.Б).

Таким образом, добавление лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты (как отдельно, так и совместно) положительно повлияло на фитозэкстракцию свинца из загрязнённой им дерново-подзолистой почв. Особенно это было заметно по содержанию Рb в корнях и в листьях. Концентрация свинца в корнях в присутствии лимонной кислоты возрастала на 240%, а в стеблях – на 214%, и максимально – в листьях, где она на 413% превышает вариант без добавления лимонной кислоты (табл. 3).

Увеличение концентрации свинца в растениях горчицы наблюдается и при добавлении нитрилотриуксусной кислоты, но в значительно меньшей степени, чем в случае лимонной кислоты. В листьях она выросла на 30%, в корнях – всего на 5%, а в стеблях даже сократилась на 30%.

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоекстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
 =====

Таблица 3. Влияние различных хелатов на содержание свинца в различных частях горчицы, мг/кг сухой массы.

Варианты	Содержание Pb, мг/кг сухой массы		
	корни	стебли	листья
А (Фон)	3,82 ± 0,38 ^d	3,00 ± 0,14 ^e	12,79 ± 0,55 ^c
В (Pb)	54,27 ± 3,21 ^c	21,08 ± 0,74 ^c	16,35 ± 0,99 ^c
С (Pb+CA)	130,05 ± 14,84 ^b	45,08 ± 0,45 ^a	67,57 ± 1,30 ^a
Д (Pb+NTA)	56,95 ± 2,75 ^c	14,68 ± 0,88 ^d	22,97 ± 3,85 ^b
Е (Pb+CA+NTA)	215,13 ± 25,10 ^a	29,59 ± 0,05 ^b	67,07 ± 3,42 ^a
НСР 0.05	33,88	1,43	6,25

Примечание: Достоверность различий вариантов а, b, с, d, e подтверждается при уровне (P < 0,05).

Эффект синергизма двух хелатов увеличил содержание свинца в корнях на 396%, в стеблях – на 40%, а в листьях – на 410% относительно варианта с загрязнением почвы свинцом без применения кислот.

Заключение

Проведенный вегетационный опыт по исследованию влияния стимулирующего эффекта применения нитрилотриуксусной кислоты и лимонной кислоты на фитоекстракцию свинца из загрязнённого им материала пахотного горизонта дерново-подзолистой почвы показал их достоверно положительный эффект на фитоекстракцию свинца.

1. Добавление нитрилотриуксусной кислоты увеличило длину и сухую массу побегов и корней, повысило содержание свинца в корнях на 5% и в листьях на 40% – по сравнению с растениями без добавления нитрилотриуксусной кислоты.

2. Добавление лимонной кислоты уменьшило длину и сухую массу побегов, но повысило длину и сухую массу корней, и главное: существенно увеличило содержание свинца в корнях – в 2,4 раза, в стеблях – в 2,1 раза и в листьях – в 4,1 раза по сравнению с растениями без добавления лимонной кислоты. При этом следует отметить, что лимонная кислота показала значительно лучший результат по накоплению свинца в разных органах растений по сравнению с нитрилотриуксусной кислотой, но при условии гораздо более

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитозэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

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

высокой дозы ее применения.

3. Совместное применение лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты привело к максимальному увеличению длины и сухой массы корней, и главное – содержания свинца: почти в 4,0 раза – в корнях, в 1,4 раза – в стеблях и в 4,1 раза – в листьях по сравнению с растениями без добавления этих кислот.

4. Максимальное содержание свинца в корнях растений наблюдалась в случае совместного применения двух кислот, но в надземной части растений – в случае применение только лимонной кислоты, которая обеспечила максимальную фитозэкстракцию свинца в стеблях, что позволяет рекомендовать именно ее к применению в качестве основного стимулирующего реагента при фиторемедиации дерново-подзолистых почв, загрязненных свинцом, без вычесывания корневой биомассы растений горчицы.

Список использованных источников:

1. Мосина Л.В., Довлетярова Э.А., Ефремова С.Ю., Норвосурэн Ж. Экологическая опасность загрязнения почвы тяжелыми металлами (на примере свинца) // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. – 2012. – № 29. – С. 383-386.

2. Hosseinniaee S., Jafari M., Tavili A., Zare S. and Cappai G. Chelate facilitated phytoextraction of Pb, Cd, and Zn from a lead–zinc mine contaminated soil by three accumulator plants // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – p. 14.

3. Сердюкова А.Ф., Барабанщиков Д.А. Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами // Молодой ученый. – 2017. – №51. – С. 131-135.

4. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А. Исследование изозимного полиморфизма у сортов ярового ячменя (*Hordeumvulgare* L.), контрастных по устойчивости к свинцу // Сел.-хоз. биол. – 2016. – Т. 51. – № 1. – С. 89-99.

5. Юрина Т.А., Драгич О.А., Дедюрина С.С. О загрязнении продуктов питания ксенобиотиками токсического происхождения // Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие агропромышленного комплекса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации». – Тюмень, 2020. – С. 573-579.

6. Ладонин Д.В. Фракционно-изотопный состав соединений свинца в почвах заповедника «Кологривский лес» // Почвоведение. – 2018. – № 8. – С. 994-1003.

7. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Карапетян Т.А., Доршакова Н.В. Влияние свинца на живые организмы // Журнал общей биологии. – 2020. – Т. 81. – № 2. – С. 147-160.

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

8. Казнина Н.М. Влияние свинца и кадмия на рост, развитие и некоторые другие физиологические процессы однолетних злаков (ранние этапы онтогенеза): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск. – 2003. – 23 с.
9. Семенова И.Н., Сингизова Г. Ш., Зулкарнаев А. Б., Ильбулова Г. Ш. Влияние меди и свинца на рост и развитие растений на примере *Anethumgraveolens L.* // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3. – С. 588-588.
10. Демиденко Г.А. Влияние свинца на рост и развитие семян и проростков гороха овощного // Вестник КрасГАУ. – 2019. – № 4. – С. 16-23.
11. Яшин И.М., Васенев И.И., Черников В.А. Экогеохимия ландшафта // М.: Изд-во РГАУ-МСХА. – 2015. – 305 с.
12. Hart G., Gilly A., Koether M., McElroy T., Greipsson S. Phytoextraction of lead (Pb) contaminated soil by switchgrass (*Panicum virgatum L.*): Impact of BAP and NTA applications // Frontiers in Energy Research. – 2022. – Vol.10. – p. 8.
13. McFarland M., Hauer M., Reuben A. Half of US population exposed to adverse lead levels in early childhood // Proc. Natl. Acad. Sci. – 2022. – Vol. 119. – p. 7.
14. Ashraf S., Ali Q., Zahir Z. A., Ashraf S., & Asghar H. N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2019. – Vol. 174. – P. 714-727.
15. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 297-312.
16. Копцик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (Обзор литературы) // Почвоведение. – 2014. – № 9. – С.1113-1130.
17. Du J. et al. Screening of Chinese mustard (*Brassica Juncea L.*) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant physiological mechanisms // Environ. Pollut. – 2020. – Vol.261. – p.10.
18. Ghazaryan K., Movsesyan H., Ghazaryan N. & Watts B. A. Copper phytoremediation potential of wild plant species growing in the mine polluted areas of Armenia // Environ. Pollut. – 2019. – Vol. 249. – P. 491-501.
19. Al-Thani R.F. & Yasseen B.T. Phytoremediation of polluted soils and waters by native Qatari plants: Future perspectives // Environ. Pollut. – 2020. – Vol. 259. – p. 16.
20. Ansari A.A., Gill S.S., Gill R., Lanza G.R., Newman L. Role of phytochelatins in phytoremediation of heavy metals contaminated soils // Phytoremediation. – 2016. – P. 393-419.
21. Guo D. et al. EDTA and organic acids assisted phytoextraction of Cd and Zn from a smelter contaminated soil by potherb mustard (*Brassica juncea*, Coss) and evaluation of its bioindicators // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2019. – Vlo.167. – P.396-403.
22. Tananonchai A., Sampanpanish P., Chanpiwat P. & Tancharakorn S. Effect of EDTA and NTA on cadmium distribution and translocation in *Pennisetum Purpureum Schum cv. Mott* // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol.26. – P. 9851-9860.
23. Bucheli-Witschel M., Egli T. Environmental fate and microbial degradation of

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И.

Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

aminopolycarboxylic acids// FEMS Microbiology Reviews. – 2001. – Vol. 25. – P. 69-106.

24. Ward T.E. Aerobic and anaerobic biodegradation of nitrilo-triacetate in subsurface soils // Ecotoxicology and Environmental Safety. –1986. –Vol. 11. – P. 112-125.

25. Ruley A. T., Sharma N.C., Sahi S.V., Singh S. R. & Sajwan K.S. Effects of lead and chelators on growth, photosynthetic activity and Pb uptake in *Sesbania Drummondii* grown in soil // Environmental Pollution. – 2006. – Vol.144. – P. 11-18.

26. Raina R., Batish D. R. & Singh H. Effect of biodegradable chelant nitrilotriacetic acid on lead (Pb) phytoextraction efficiency of *Coronopus Didymus* grown in Pb-contaminated soil // Annals of Plant and Soil Research. – 2023. – Vol. 25. – P. 79-83.

27. Freitas E.V., Nascimento C.W., Souza A., Silva F.B. Citric acid-assisted phytoextraction of lead: A field experiment // Chemosphere. – 2013. – Vol. 92. – P. 213-217.

28. Aderholt M., Vogelien D.L., Koether M., Greipsson S. Phytoextraction of contaminated urban soils by *Panicum virgatum* L. enhanced with plant growth regulator (BAP) and citric acid // Chemosphere. – 2017. – Vol. 175. – P. 85-96.

29. Meers E., Lesage E., Lamsal S., Hopgood M., Vervaeke P., Tack F.M.G., Verloo M.G. Enhanced phytoextraction: I. effect of EDTA and citric acid on heavy metal mobility in a calcareous soil // International Journal of Phytoremediation. – 2005. –Vol. 7. – P. 129-142.

30. Fuentes A.L.B., José C., de los Ríos A., do Carmo L.L., de Iorio A.F., Rendina A.E. Phytoextraction of heavy metals from a multiply contaminated dredged sediment by chicory (*Cichorium intybus* L.) and castor bean (*Ricinus communis* L.) enhanced with EDTA, NTA, and citric acid application // International Journal of Phytoremediation. – 2018. – Vol. 20. – P. 1354-1361.

31. Бганцова М.В. Использование горчицы сарептской и райграса пастбищного для фиторемедиации загрязненных свинцом почв // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 324. – С. 350-353.

32. Вагун И. В. Продукционный процесс и фиторемедиационный потенциал сортов рапса на загрязненных тяжелыми металлами почвах: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М. – 2011. – 21 с.

Цитирование:

Одех И., Жевнеров А.В., Васенев И.И. Экологическая оценка влияния лимонной кислоты и нитрилотриуксусной кислоты на фитоэкстракцию свинца из загрязненных почв с использованием горчицы сарептской [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2024. – № 6. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/6/st_626.pdf DOI: <https://doi.org/10.51419/202146626>.