ФИЗИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, МИКОЛОГИЯ
PHYSIOLOGY AND ECOLOGY OF THE PLANT, MYCOLOGY

УДК 502.572 : 504.05 DOI : 10.5281/zenodo.13949418 EDN : WPGBUJ

© **О. В. Фрунзе**

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ СВИНЦА И КОБАЛЬТА НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЕКОРАТИВНЫХ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Россия, 283050, ДНР, г. Донецк, ул. Щорса, 46

Фрунзе О. В. **Влияние ионов свинца и кобальта на фотосинтетический аппарат декоративных травянистых растений.** – Исследовали изменение содержания фотосинтетических пигментов у некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения почвы ионами свинца и кобальта. Проведенные исследования показали, что загрязнение почвы кобальтом и свинцом не оказывает негативного влияния на интенсивность фотосинтеза проростков *Linum usitatissimum* L., в то время как у проростков *Tagetes patula* L. отмечено угнетение интенсивности фотосинтеза во всех вариантах загрязнения. Установлено, что наибольшим содержанием фотосинтетических пигментов характеризуются проростки *L. usitatissimum*, тогда как пигментный состав проростков *T. patula* оказался более чувствительным к негативному влиянию ионов кобальта и свинца. При комплексном внесении загрязнителей токсический эффект тяжелых металлов на фотосинтетический аппарат усилился.

Ключевые слова: свинец, кобальт, декоративные травянистые растения, фотосинтетические пигменты.

Введение

В результате бурного развития промышленности, энергетического комплекса и транспортных коммуникаций, интенсивной добычи полезных ископаемых, происходит резкий рост загрязнения окружающей среды и в первую очередь почв. Особое место среди загрязнений занимают тяжелые металлы. Сегодня влияние автотранспорта на загрязнение биосферы Донецкого региона считается доминирующим и составляет 72,7 % от общего объема загрязняющих веществ, поступающих в урбанизированную среду [1, 2]. Быстрый рост числа автомашин, которые отмечен в последнее время, является причиной резкого ухудшения экологической обстановки в Донецкой Народной Республике. Как следствие, увеличился уровень загрязнения свинцом и кобальтом городской среды и особенно почв, которые обладают способностью к сорбции и депонированию ионов тяжелых металлов. Накоплению свинца и кобальта в почвах способствует также слабая подвижность большинства их соединений при высоких pH [3, 6, 9]. Сжигание мусора сопровождается поступлением в биосферу целого ряда тяжелых металлов: кадмия, ртути, свинца, кобальта, цинка и др.

Для крупных городов с многопрофильной промышленностью характерно присутствие в окружающей среде не отдельного загрязнителя, а ассоциации тяжелых металлов, способных оказывать комбинированное действие на организм, при котором может наблюдаться как суммирование эффектов, так и их потенцирование [4, 7]. Опасные уровни загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами отмечаются во многих промышленных развитых территориях.

В присутствии тяжелых металлов наблюдаются определенные изменения в анатомической структуре листа: уменьшаются размеры клеток мезофилла и толщина клеточной стенки, снижаются число и размеры хлоропластов, а также размеры замыкающих клеток устьиц [5, 6].

Ионы свинца и кобальта вызывают различные нарушения в структурной организации хлоропластов: уменьшение числа гран и тилакоидов, снижение протяженности мембран [9].

© **Фрунзе О. В., 2024**

Было доказано, что в присутствии высоких концентраций целого ряда тяжелых металлов (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn и др.) обнаружено снижение содержания хлорофиллов *a* и *b*. При этом на листьях растений наблюдались хорошо выраженные хлорозы. Главной причиной снижения содержания зеленых пигментов в присутствии тяжелых металлов является подавление биосинтеза хлорофилла, что, прежде всего, связано с непосредственным действием металлов на активность ферментов биосинтеза, в частности, хлорофиллсинтазы. В свою очередь, нарушение биосинтеза хлорофилла в присутствии Cd, Cu, Ni, Pb и Zn может быть вызвано вытеснением этими ионами иона Mg^{2+} из молекулы хлорофилла [4].

Поэтому целью нашего исследования было изучить изменение содержания фотосинтетических пигментов у некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения почвы ионами свинца и кобальта.

Материал и методы исследования

При проведении эксперимента в качестве объектов исследования были использованы декоративные травянистые растения : *Linum usitatissimum* L. и *Tagetes patula* L.

Исследования изменения содержания фотосинтетических пигментов у проростков проводились по схеме полного двухфакторного трехуровневого эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

Схема эксперимента влияния ионов свинца и кобальта на содержание фотосинтетических пигментов проростков декоративных травянистых растений

Вариант загрязнения	Загрязнители	
	Pb^{2+}, мг/кг	Co^{2+}, мг/кг
1	0 (контроль)	0 (контроль)
2	0	5
3	0	10
4	32	0
5	64	0
6	32	5
7	64	10

В качестве загрязнителей использовались сульфат свинца и сульфат кобальта по стехиометрическому отношению. Концентрации свинца и кобальта составляли 1 ПДК и 2 ПДК.

Семена растений проращивались согласно их биологическим особенностям. Выращивание велось на протяжении тридцати дней, продолжительности светового дня 14 ч, температуре 20–22 °С и влажности почвы около 70 % полной влажности. В каждый сосуд вносилось по 350 г почвы, просеянной через почвенное сито с диаметром отверстий 3 мм, в который предварительно вносился сульфат свинца и сульфат кобальта согласно схеме эксперимента.

Содержание зеленых пигментов определяли спектрофотометрическим методом при длине волн: 440,5 нм, 649 нм и 440,5 нм. Вычисление содержания пигментов в навеске растительного материала проводили по формулам Ветштейна [7]. Полученные данные обрабатывали статистически с помощью специально разработанных программ.

Результаты и обсуждение

Высокие концентрации свинца и кобальта отрицательно сказываются на процессе фотосинтеза, что выражается в снижении скорости фотосинтеза, частичном разрушении

ультраструктуры хлоропластов, уменьшении синтеза хлорофилла, пластохинона и каротиноидов, нарушении переноса электронов, угнетении активности ферментов цикла Кальвина, а также в дефиците CO_2 в результате закрытия устьиц. У чувствительных к загрязнению видов наблюдались отчетливые изменения в тонкой структуре хлоропластов, уменьшалось количества гранул, а также стромы по отношению к пластинчатой системе. Под влиянием ионов свинца и кобальта также изменялся липидный состав тилакоидных мембран [8–10].

Ионы свинца угнетают синтез хлорофилла, снижая связывание растениями таких важных элементов, как магний и железо. Он оказывает токсическое влияние на фотосинтетический аппарат растений благодаря своему сродству к белковыми N- и S-лигандами. Под действием свинца в растениях происходит усиление разрушения хлорофилла благодаря повышенной активности хлорофиллазы. Проведенные исследования показали, что незначительные концентрации ионов свинца оказывали негативное влияние на содержание хлорофилла *a* проростков *L. usitatissimum*, его содержание уменьшилось на 8 % (вар. 2), а с увеличением концентрации загрязнителя содержание хлорофилла *a* снизилось на 27 % (вар. 3), по сравнению с контролем. При внесении в почву 1 ПДК свинца наблюдалось уменьшение содержания хлорофилла *a* на 2 % (вар. 4), но данные изменения были статистически недостоверными, а при концентрации свинца 2 ПДК (вар. 5) содержание хлорофилла *a* оставалось на уровне контроля (табл. 2). Только при комплексном внесении загрязнителей в концентрации 2 ПДК было отмечено уменьшение концентрации хлорофилла *a* на 8 %, в сравнении с растениями, выращенными на незагрязненной почве.

При внесении в почву 1 ПДК кобальта концентрация хлорофилла *b* проростков *L. usitatissimum* увеличилась на 9 %, а при увеличении концентрации поллютанта до 2 ПДК, содержание хлорофилла *b* уменьшилось на 6 %, в сравнении с контролем. В условиях загрязнения почвы 1 ПДК свинца содержание хлорофилла *b* уменьшилось на 7 %, однако с увеличением концентрации ионов свинца до 2 ПДК концентрация хлорофилла *b* увеличилась на 10 % от контроля. Только при комплексном внесении загрязнителей в концентрации 2 ПДК содержание хлорофилла *b* проростков уменьшилось на 22 %.

При отдельном внесении в почву 1 ПДК кобальта сумма хлорофиллов *a*+*b* проростков *L. usitatissimum* практически оставалась на уровне контроля, однако, при увеличении концентрации кобальта до 2 ПДК, количество хлорофиллов уменьшилось на 15 % от контроля. При отдельном внесении ионов свинца в концентрации 1 ПДК и 2 ПДК показатель суммы хлорофиллов *a*+*b* практически не отличался от контроля. И только при совместном действии ионов тяжелых металлов (вар. 7) сумма хлорофиллов уменьшилась на 16 %.

Нужно отметить, что содержание хлорофилла *b* отличалось меньшим снижением от контроля, по сравнению с хлорофиллом *a* у проростков *L. usitatissimum*. Возможно, это связано с тем, что хлорофилл *b,* который входит в светособирающий комплекс, более устойчив к действию токсикантов.

Исследования показали, что пигментный комплекс *T. patula* более чувствителен к действию ионов свинца. Так, при внесении в почву 1 ПДК и 2 ПДК кобальта концентрация хлорофилла *a* у проростков практически не отличалась от контроля, однако внесение в почву 1 ПДК и 2 ПДК свинца привело к уменьшению содержания хлорофилла *a* проростков на 43 %. При комплексном внесении загрязнителей концентрация хлорофилла *a* уменьшилась на 33–40 % от контроля.

В условиях внесения в почву 1 ПДК и 2 ПДК кобальта концентрация хлорофилла *b* проростков *T. patula* увеличилась на 31–45 %, в сравнении с растениями, выращенными на незагрязненной почве. Однако при внесении в почву 1 ПДК свинца содержание хлорофилла *b* проростков уменьшилось на 21 %, а с последующим увеличением концентрации поллютанта до 2ПДК – на 12 %. При комплексном внесении загрязнителей концентрация хлорофилла *b* уменьшилась на 8–13 % от контрольного показателя.

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов проростков декоративных травянистых растений

№	Содержание хлорофилла *a* (мг/г сырой массы)			Содержание хлорофилла *b* (мг/г сырой массы)			Содержание хлорофилла (*a*+*b*) (мг/г сырой массы)		
	M±m	t^D	D	M±m	t^D	D	M±m	t^D	D
Linum usitatissimum L.									
1	0,277±0,02	–	–	0,340±0,01	–	–	0,617±0,01	–	–
2	0,256±0,03	-0,021	92	0,370±0,02	0,03	109	0,627±0,06	0,01	102
3	0,201±0,01	-0,076	73	0,321±0,03	-0,019	94	0,522±0,03	0,095	85
4	0,271±0,01	-0,006	98	0,317±0,01	-0,023	93	0,588±0,01	0,029	95
5	0,278±0,01	0,001	100	0,373±0,01	0,033	110	0,634±0,01	0,017	103
6	0,287±0,00	0,01	104	0,347±0,01	0,007	102	0,634±0,01	0,017	103
7	0,255±0,00	-0,022	92	0,266±0,01	-0,074	78	0,521±0,02	0,096	84
Tagetes patula L.									
1	0,250±0,06	–	–	0,400±0,05	–	–	0,650±0,12	–	–
2	0,283±0,02	0,033	113	0,677±0,04	0,277	169	0,960±0,06	0,31	148
3	0,279±0,02	0,029	111	0,619±0,07	0,219	155	0,898±0,09	0,248	138
4	0,143±0,01	-0,107	57	0,317±0,01	-0,083	79	0,460±0,01	-0,19	71
5	0,143±0,04	-0,107	57	0,352±0,13	-0,048	88	0,497±0,17	-0,153	76
6	0,163±0,01	-0,087	67	0,366±0,05	-0,034	92	0,529±0,07	-0,121	81
7	0,151±0,11	-0,099	60	0,349±0,01	-0,051	87	0,500±0,01	-0,15	77

Подобная тенденция прослеживалась и при изучении изменения содержания суммы хлорофиллов у проростков *T. patula*. Так, при внесении 1 ПДК и 2 ПДК кобальта концентрация суммы хлорофиллов увеличилась на 38–48 %, в сравнении с растениями, выращенными на незагрязненной почве. В условиях загрязнения 1 ПДК свинца сумма хлорофиллов уменьшилась на 29 %, а при 2 ПДК свинца – на 24 % от контроля. При совместном действии поллютантов сумма хлорофиллов уменьшилась на 19–23 %.

Главной причиной уменьшения концентрации фотосинтетических пигментов в условиях загрязнения почвы ионами свинца и кобальта является угнетение биосинтеза хлорофилла, которое напрямую связано с негативным влиянием ионов тяжелых металлов на активность ферментов биосинтеза. Основными точками ингибирования при этом выступают образование фотоактивного хлорофиллидредуктазного комплекса и синтез δ-аминолевулиновой кислоты. Основное влияние ионов тяжелых металлов на фотосинтетические пигменты, как полагают многие ученые, связано с дефицитом железа. Кроме того, ингибирование биосинтеза хлорофилла в присутствии ионов свинца и кобальта может быть связано с вытеснением данными ионами Mg^{2+} их молекулы хлорофилла.

Выводы

Загрязнение почвы кобальтом и свинцом не оказывает негативного влияния на интенсивность фотосинтеза проростков *L. usitatissimum*, в то время как у проростков *T. patula* отмечено угнетение интенсивности фотосинтеза во всех вариантах загрязнения. Установлено, что наибольшим содержанием фотосинтетических пигментов характеризуются

проростки *L. usitatissimum*, тогда как пигментный состав проростков *T. patula* оказался более чувствительным к негативному влиянию ионов кобальта и свинца. При комплексном внесении загрязнителей токсический эффект тяжелых металлов на фотосинтетический аппарат усилился.

Список литературы

1. *Алемасова А. С., Сафонов А. И.* Тяжелые металлы в фитосубстратах – индикаторы антропогенного загрязнения воздуха в промышленном регионе // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 6. С. 5–13.

2. *Высоцкий С. П., Фрунзе О. В.* Фитореабилитация близлежащих к автомобильным трассам территорий // Вестник Автомобильно-дорожного института Донецкого национального технического университета. 2019. Вып. 2 (29). С. 59–65.

3. *Сафонов А. И.* Новые виды растений в экологическом мониторинге Донбасса // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. 2020. № 1. С. 96–100.

4. *Фрунзе О. В.* Фиторемедиация почв, загрязненных ионами тяжелых металлов, с помощью древесных и кустарниковых растений // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 6. С. 92–98.

5. *Batayneh A. T.* Toxic (aluminum, beryllium, boron, chromium and zinc) in groundwater: Health risk assessment // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2012. Vol. 9. P. 153–162.

6. *Glick B. R.* Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment // Biotechnology Advances. 2010. Vol. 21, N 5. P. 383–393.

7. *Grigoletto T. L. B.* Lead in drinking water from Ribeirão Preto (SP): chemical, physical factors and possible correlations with the contamination of children. São Paulo : University of São Paulo, 2011. 83 p.

8. *Junior A. M. D., Oliva M. A., Ferreira F. A.* Dispersal pattern of airborne emissions from an aluminium smelter in Ouro Preto, Brasil, as expressed by foliar fluoride accumulation in eight plant species // Ecological Indicators. 2012. Vol. 8, N 5. P. 454–461.

9. *Kramer U.* Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils // Current Opinion in Biotechnology. 2008. Vol. 16, N 2. P. 133–141.

10. *Pilon-Smits E., Pilon M.* Phytoremediation of metals using transgenic plants // Critical Reviews in Plant Sciences. 2014. Vol. 21, N 5. P. 439–456.

Поступила в редакцию 10.07.2024 г.

Frunze O. V. **Influence of lead and cobalt ions on the photosynthetic apparatus of ornamental herbaceous plants**. **–** Changes in the content of photosynthetic pigments in some species of ornamental herbaceous plants were studied under conditions of controlled soil contamination with lead and cobalt ions. Studies have shown that soil contamination with cobalt and lead does not adversely affect the photosynthesis intensity of seedlings of *Linum usitatissimum* L., while seedlings of *Tagetes patula* L. The inhibition of photosynthesis intensity was noted in all pollution variants. It was found that the highest content of photosynthetic pigments is characterized by seedlings of *Linum usitatissimum* L., whereas the pigment composition of seedlings of *Tagetes patula* L. It turned out to be more sensitive to the negative effects of cobalt and lead ions, and with the complex introduction of pollutants. The toxic effect of heavy metals on the photosynthetic apparatus increased.

Key words: lead, cobalt, ornamental herbaceous plants, photosynthetic pigments.

Сведения об авторах

Фрунзе Оксана Валентиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры физиологии растений ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, ДНР, РФ.

E-mail : hromyh82@mail.ru

ORCID : 0000-0003-1082-7012 AuthorID : 1053340