

DOI 10.54596/2958-0048-2024-1-28-36

УДК 68.35.29

МРНТИ 68.35.29

ФОТОСИНТЕЗ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ НА СРЕДЕ С ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ПЕКТИНОМ

Сафронова Н.М.^{1*}, Мустафина А.Е.¹

^{1*}Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова, Кокшетау, Республика Казахстан

*E-mail: safronat@rambler.ru

Аннотация

Пектины благодаря своим высоким адсорбционным способностям рассматриваются как средство для очистки водоемов и почв от тяжелых металлов. В исследовании стояла цель выяснить как внесение пектинов в питательную среду будет влиять на токсичность таких тяжелых металлов как кадмий и цинк. Установлено, что кадмий в концентрации 10^{-4} Моль и цинк в концентрации 5 мМоль тормозили накопление биомассы растениями 10-дневных проростков твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.). Пектины смягчали этот эффект, но в незначительной степени. Кроме того, отмечалось некоторое увеличение доли корней у проростков варианта с тяжелыми металлами и пектином. Площадь листьев проростков также уменьшалась под влиянием тяжелых металлов, в наибольшей степени страдали молодые листья. Добавление пектинов негативно сказывалось на формировании листовой поверхности, отмечалось снижение этого показателя. Показано, что пектины способствуют увеличению содержания органического углерода у растений пшеницы, при этом содержание основных пигментов фотосинтеза снижается. Однако, в вариантах с пектинами фотохимическая активность хлоропластов поддерживается на более высоком уровне, чем на растворах только с тяжелыми металлами.

Ключевые слова: яблочный пектин, тяжелые металлы, твердая пшеница, фотосинтез.

АУЫР МЕТАЛДАР МЕН ПЕКТИН БАР ОРТАДА ӨСЕРІЛГЕН БИДАЙ ӨСКІНДЕРІНІҢ ФОТОСИНТЕЗ

Сафронова Н.М.^{1*}, Мустафина А.Е.¹

^{1*}Ш. Уалиханов атындағы Көкшетау университеті,

Көкшетау, Қазақстан Республикасы

*E-mail: safronat@rambler.ru

Аңдатпа

Пектиндер жоғары адсорбциялық қабілеттеріне байланысты су объектілері мен топырақты ауыр металдардан тазартатын құрал ретінде қарастырылады. Зерттеу пектиндерді өсіру ортасына енгізу кадмий және мырыш сияқты ауыр металдардың уыттылығына қалай әсер ететінін анықтауға бағытталған. 10^{-4} Моль концентрация- сындағы кадмий мен 5 мМоль концентрациясындағы мырыш өсімдіктердің 10 күндік қатты бидай өскіндерінің (*Triticum durum* Desf) биомассасының жиналуын тежейтіні анықталды. Пектиндер бұл әсерді жұмсартады, бірақ шамалы. Сонымен қатар, ауыр металдар мен пектин бар нұсқаның өскіндерінде тамыр үлесінің біршама өсуі байқалды. Өскіндердің жапырақтарының ауданы ауыр металдардың әсерінен де азайды, жас жапырақтар ең көп зардап шекті. Пектиндердің қосылуы жапырақ бетінің қалыптасуына теріс әсер етті, бұл көрсеткіштің төмендеуі байқалды. Пектиндер бидай өсімдіктерінде органикалық көміртектің көбеюіне ықпал етеді, Фотосинтездің негізгі пигменттерінің мөлшері төмендейді. Алайда, пектиндермен нұсқаларда хлоропласттардың фотохимиялық белсенділігі тек ауыр металдармен ерітінділерге қарағанда жоғары деңгейде сақталады.

Түйінді сөздер: алма пектині, ауыр металдар, қатты бидай, фотосинтез.

PHOTOSYNTHESIS OF WHEAT SEEDLINGS WHEN GROWN IN A MEDIUM WITH HEAVY METALS AND PECTIN

Safronova N.M.^{1*}, Mustafina A.E.¹.

¹*Shokan Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Republic of Kazakhstan

*E-mail: safronat@rambler.ru

Abstract

Pectins are considered as a means for cleaning reservoirs and soils from heavy metals due to their high adsorption properties. The aim of the study was to find out how the adding of pectins into the nutrient medium would affect the toxicity of heavy metals such as cadmium and zinc. It was found that cadmium at a concentration of 10⁻⁴ Mol and zinc at a concentration of 5 mMol inhibited the accumulation of biomass by plants of 10-day durum wheat seedlings (*Triticum durum* Desf.). Pectins mitigated this effect, but to a small extent. In addition, there was a slight increase in the proportion of roots in seedlings of the variant with heavy metals and pectin. The leaf area of the seedlings also decreased under the influence of heavy metals, young leaves suffered the most. The addition of pectins had a negative effect on the formation of the leaf surface, and a decrease in this indicator was noted. It has been shown that pectins contribute to an increase in the content of organic carbon in wheat plants, while the content of the main pigments of photosynthesis decreases. However, in variants with pectins, the photochemical activity of chloroplasts is maintained at a higher level than in solutions with heavy metals only.

Keywords: apple pectin, heavy metals, durum wheat, photosynthesis.

Введение

В настоящее время осуществляется поиск средств, способных поглощать токсичные вещества, снижая тем самым имеющих уровень загрязнения природных сред. В качестве таких средств рассматриваются пектины, вещества природного происхождения. Они обладают высокими сорбционными свойствами благодаря своей химической структуре и электрическому заряду [1]. Ряд исследований подтверждают адсорбционные свойства пектинов по отношению к тяжелым металлам. С помощью пектинов, полученных из различных растительных остатков, можно удалять мышьяк, кадмий, цинк, свинец и другие металлы из водных растворов [2-5]. Для улучшения очистки пектины модифицируют различным образом [2, 3]. В целом, они рассматриваются как средство, которое доступно, имеет низкую стоимость и легко подвергается биodeградации [6]. Следовательно, пектины могут быть эффективным инструментом для борьбы с загрязнением окружающей среды тяжелыми металлами.

Между тем, в научных исследованиях в основном рассматриваются адсорбционные свойства пектинов в водных растворах, содержащих только один токсичный металл, в то время как природные водные среды имеют в своем составе комплекс ионов [6]. Кроме того, практически не рассматриваются вопросы влияния внесения пектинов в растворы с тяжелым металлом на жизнедеятельность растений. В связи с этим представляло интерес оценить фитотоксичность тяжелых металлов, таких как кадмий и цинк, в присутствии пектинов в водной среде. В качестве индикатора фитотоксичности были выбраны показатели фотосинтеза, поскольку это наиболее важный биохимический процесс, определяющий процессы роста и жизнедеятельности растений.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали пшеницу твердую (*Triticum durum* Desf.) сорта Одесская. Семена перед посевом стерилизовали этиловым спиртом. Проращивали семена на дистиллированной воде методом рулонной культуры, затем 3-х-дневные проростки переносили на питательный раствор, содержащий в процентах следующие основные макро- и микроэлементы: азот – 15, фосфор – 30, калий – 15, магний

– 0,5, бор – 0,02, медь – 0,01, железо хелатное – 0,1, марганец – 0,05, молибден – 0,01, цинк – 0,01. В экспериментах создавали 3 варианта: контроль – питательный раствор, опытный вариант с токсичной дозой тяжелого металла, и опытный вариант для изучения адсорбционных свойств пектина – вносили яблочный пектин (1,5 г/100 мл) в питательный раствор с тяжелым металлом. Доза кадмия составила 10^{-4} Моль CdCl_2 , в экспериментах с цинком питательный раствор содержал 5 мМоль ZnSO_4 .

По окончании эксперимента у проростков пшеницы определяли площадь листовой поверхности, содержание пигментов фотосинтеза, фотохимическую активность хлоропластов и интенсивность фотосинтеза по накоплению органических веществ. Площадь листьев пшеницы определяли расчетным методом по методике, предложенной И.А. Щербиной с сотрудниками [7]. Содержание пигментов фотосинтеза определяли в спиртовой вытяжке стандартным спектрофотометрическим методом [8], рассчитывали в мг/г сырой массы. Фотосинтетическую активность хлоропластов определяли по скорости реакции Хилла, которую выражали в мг/г/мин [9]. Хлоропласты выделяли методом дифференциального центрифугирования [9], для этого использовали 0,05 М калий-натриевый фосфатный буфер, содержащий 0,40 М сахарозы и 0,01 М KCl . Содержание углерода в листьях определяли мокрым сжиганием в хромовой смеси по Х.К. Аликову [10] и выражали в мг углерода/г сухого вещества.

Результаты обрабатывали статистически с помощью пакета программ Excel.

Результаты и их обсуждение

Как показали наши исследования, тяжелые металлы оказывают существенное влияние на рост проростков твердой пшеницы. Наличие токсичных доз кадмия и цинка в питательном растворе отражалось на формировании биомассы и листовой поверхности растений. Так, под влиянием 10^{-4} М хлорида кадмия и 5мМ сульфата цинка сырая биомасса растений снижалась на 42 % (рис.1, А и Б). Также изменялось и соотношение корень/побег. На растворе цинка у проростков этот показатель снижался в 1,5 раза (рис. 1, Б). Более существенное торможение роста корней под влиянием тяжелых металлов отмечается и в работах других исследователей [11-13]. Это объясняется тем, что корни непосредственно контактируют с раствором токсиканта и на них ложится основная нагрузка по их инаktivации [12, 14].

Добавление пектинов в питательные растворы с тяжелыми металлами оказывало разный эффект на накопление биомассы в зависимости от токсиканта. Проростки пшеницы варианта с кадмием и пектинами росли лучше, чем в случае, когда пектины не вносились: их сырая биомасса была на 14% больше. В то же время, в варианте с цинком, проростки хуже росли в присутствии пектинов. Однако, этот эффект был слабо выражен (6,8% разницы). Кроме того, пектины смягчали действие тяжелого металла: рост корней у проростков пшеницы замедлялся в меньшей степени, чем рост побега, вследствие чего соотношение корень/побег снижалось на 16,5% (в 1,2 раза).

По данным наших экспериментов, присутствие кадмия в питательном растворе негативно отражалось на формировании листовой поверхности 10-дневных проростков пшеницы (рис.2, А). Общая площадь листьев снижалась на 16,7% по сравнению с контролем. Сравнительный анализ площадей первого и второго листа проростков пшеницы показал, что внесение кадмия сказалось в большей степени на развитии второго листа. Так, площадь первого листа в условиях избытка кадмия относительно контроля уменьшилась на 12,2 %, в то время как рост второго листа затормозился в большей степени – на 22 %.

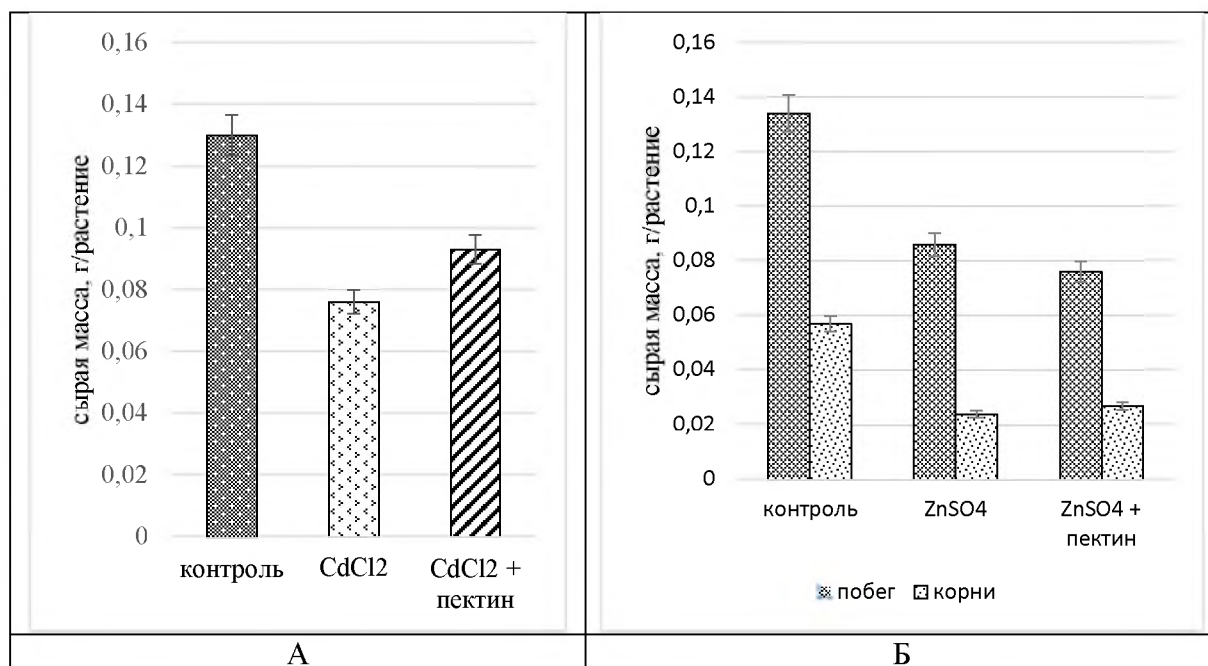


Рисунок 1. Влияние кадмия (А) и цинка (Б) на накопление сырой массы проростков пшеницы (г/растение)

Добавление пектина в раствор с кадмием не смягчало его действия, а, напротив, усугубляло, что особенно проявилось на формировании ассимиляционной поверхности второго листа, она снижалась на 36% по сравнению с контролем, а общая площадь на 23,2%.

Известно, что рост первого листа определяется главным образом питательными веществами, заложенными в зерновке [15], поэтому для его развития влияние внешней среды имеет меньшее значение, чем для последующих, когда растение начинает питаться автономно от семени. На отсутствие эффекта адсорбции кадмия пектинами указывает разница площадей 1 и 2 листа. В контроле она составила 20%, в то время как в условиях избытка кадмия разница между площадями первого и второго листа в сравнении с контролем увеличилась на 9%. В варианте с добавлением пектина, площадь 2 листа была на 42% меньше площади первого листа.

В экспериментах с внесением цинка были получены сходные результаты. Цинк в выбранной концентрации тормозил рост ассимиляционной поверхности листьев пшеницы, площадь листьев была почти на 46,7% меньше, чем в контроле. При этом, площадь 1 листа снизилась на 35,7% по сравнению с контролем, а площадь 2 листа на 62,4% (рис. 2, Б). Поверхность листьев у проростков пшеницы в варианте с пектинами, была меньше, чем у варианта только с тяжелым металлом, на 8,3%. При этом площадь второго листа под действием пектина снизилась на 75% по отношению к контролю (рис. 2, Б).

Таким образом, торможение накопления растениями сырой биомассы и роста листьев указывает на отсутствие эффекта адсорбции кадмия пектинами.

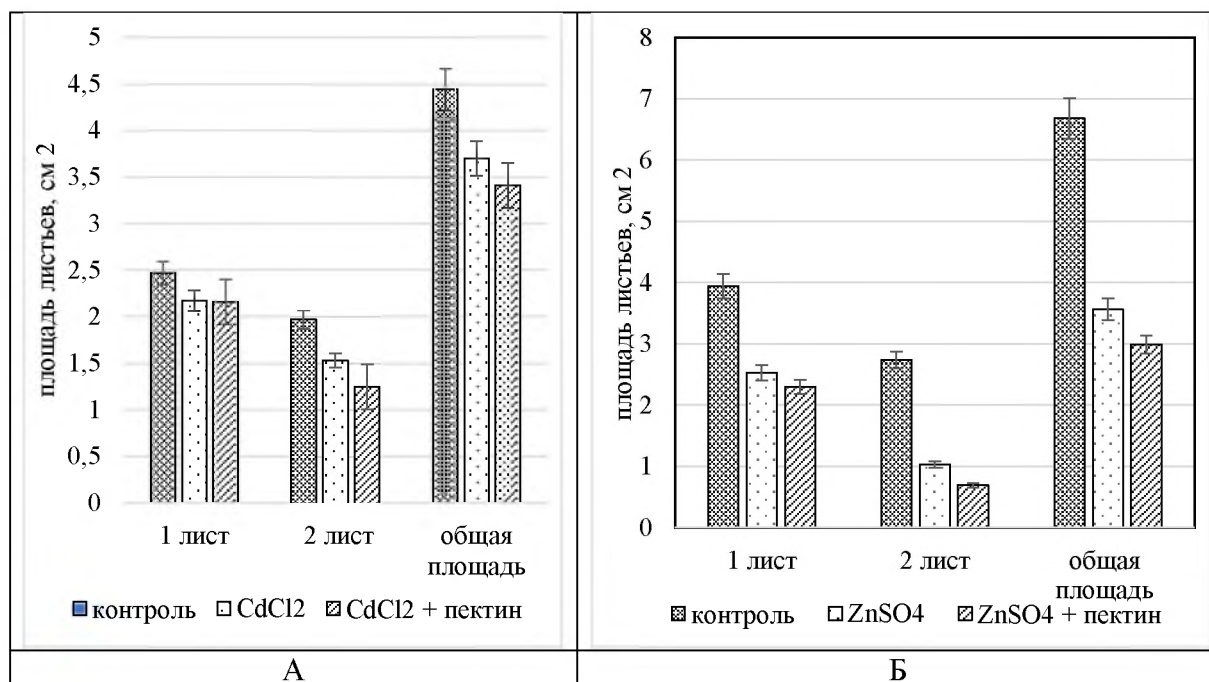


Рисунок 2. Площадь листьев проростков пшеницы в зависимости от внесения кадмия (А) и цинка (Б) в питательный раствор

Содержание органического углерода показывает насколько эффективен был фотосинтез. Было установлено, что под влиянием цинка этот показатель несущественно, но возрастал в листьях, на 10,41% (табл.1). При добавлении пектинов в питательную среду, содержание углерода увеличивалось уже существенно по отношению к контролю, на 48,05%.

В корнях проростков твердой пшеницы, росших в условиях избытка цинка, содержание органического углерода также возрастало (на 15,57%) по сравнению с контролем, а внесение пектинов, напротив, снижало этот показатель по отношению к варианту с цинком (табл. 1). Это можно объяснить тем, что на варианте с пектином рост корней тормозился меньше, чем в случае без него, и поэтому можно предположить, что ингибирование фотосинтеза было незначительным.

Таблица 1. Содержание углерода в проростках пшеницы в условиях избытка цинка

	Содержание органического углерода, мг/г сухого вещества		
	Контроль	ZnSO ₄	ZnSO ₄ + пектин
Побег	19,19±0,21*	21,42±0,31	28,41±0,35
Корни	104,95±1,02	121,29±2,15	111,14±1,12

*указано стандартное отклонение

Таким образом, несмотря на снижение биомассы и уменьшение листовой поверхности под влиянием тяжелых металлов, содержание органических веществ, которое является результатом фотосинтетических процессов, в целом изменялось слабо.

Согласно ряду исследований, при повышенном содержании кадмия наблюдается снижение концентраций хлорофиллов и каротиноидов, при этом соотношение этих пигментов остается относительно стабильным [16, 17]. В наших исследованиях были получены аналогичные результаты (рис. 3). Как видно из рисунка, содержание

хлорофиллов *a* и *b* значительно снизилось, на 30% и 40% соответственно, а содержание каротиноидов снижалось в меньшей степени, на 17%. Возможно, что более высокое соотношение каротиноиды/хлорофиллы способствовало поддержанию активности хлоропластов на более высоком уровне, ведь известно, что каротиноиды выполняют защитные функции по отношению к хлорофиллам [16, 17]. В вариантах с пектином не наблюдалось положительного эффекта, а, напротив, содержание всех пигментов уменьшалось по сравнению с вариантом, где вносился только тяжелый металл (рис. 3), причем содержание каротиноидов падало меньше (на 33,7%), чем хлорофиллов *a* и *b*, на 40,8 и 47,7% соответственно, по отношению к контролю.

Таким образом, сокращение площади листьев под влияние тяжелого металла сопровождалось уменьшением содержания основных пигментов фотосинтеза и перестройкой фотосинтетического аппарата в сторону защиты от негативного воздействия.

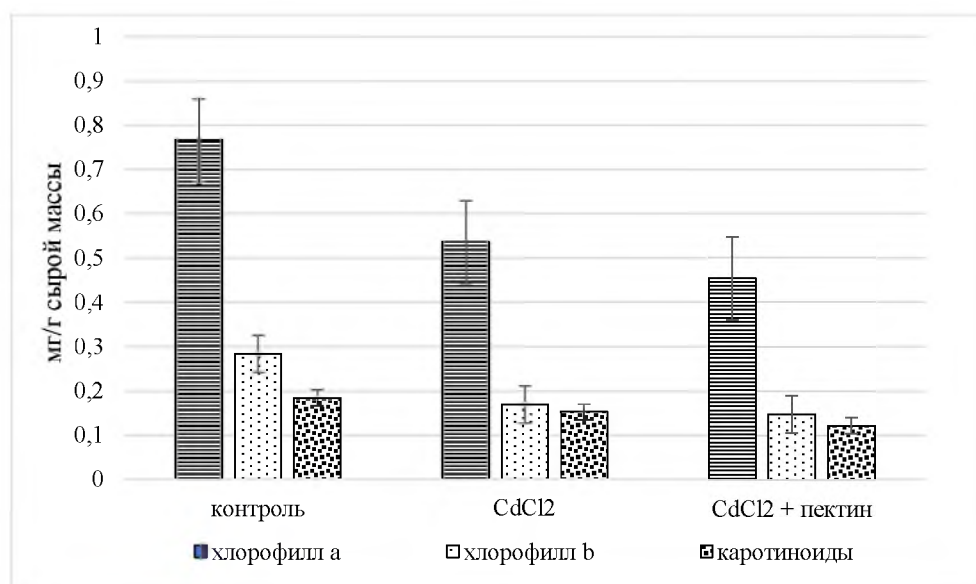


Рисунок 3. Влияние кадмия на содержание пигментов фотосинтеза (мг/растение) у проростков пшеницы

Фотохимическая активность хлоропластов характеризует работу первичных фотохимических стадий фотосинтеза, которые являются источником энергии для процессов восстановления CO_2 . В ряде научных работ по изучению влияния кадмия на фотосинтез растений получены результаты о значительном снижении фотосинтетической активности хлоропластов [16, 17].

Как показали наши исследования, фотохимическая активность хлоропластов при токсичных концентрациях кадмия существенно снижалась в 1,9 раза на 1 г сырой массы и на 47,4 % в расчете на целое растение по сравнению с контролем (табл. 2). Добавление пектинов положительно сказалось на фотохимической активности хлоропластов у проростков твердой пшеницы: в вариантах с пектином удельная активность хлоропластов (мг/1 мин/г сырой массы) возрастала на 21,5%. Однако, вследствие сокращения площади листовой поверхности под влиянием тяжелого металла, общая активность в перерасчете на целое растение была на том же уровне, что и в вариантах без пектина.

Таблица 2. Фотохимическая активность хлоропластов (А) в условиях избытка кадмия

	А, мг/1 мин	
	на 1 г сырой массы	на целое растение
Контроль	61,62 ± 1,03*	12,30 ± 0,20
CdCl ₂	32,40 ± 0,23	8,10 ± 0,06
CdCl ₂ + пектин	41,34 ± 0,22	8,20 ± 0,05

*указано стандартное отклонение

Можно сделать предположение, что более высокое содержание органического углерода в проростках пшеницы при воздействии кадмия связано с торможением ростовых процессов. Благодаря пектинам фотохимическая активность хлоропластов поддерживалась на более высоком уровне, однако проростки имели биомассу меньше, чем в случае только с тяжелым металлом. Возможно, это было связано с кислородным голоданием, поскольку среда с пектинами более вязкая. Следует также учитывать, что пектины могут адсорбировать и другие элементы, в том числе и такие важные для растений, как кальций и калий [18].

Заключение

Установлено, что накопление сырой биомассы 10-дневными проростками твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) снижалось при внесении в питательную среду кадмия в концентрации 10⁻⁴ Моль и цинка в концентрации 5 мМоль, на 42% и 36% соответственно. Внесение пектина оказывало относительно слабое положительное влияние на этот процесс, на растворе с кадмием и пектинами биомасса растений возрастала на 14%, на растворе с цинком и пектинами отмечалось только увеличение биомассы корней, на 8 %.

Отмечалось торможение роста фотосинтетической поверхности при внесении тяжелых металлов в токсичных концентрациях: общая площадь листьев снижалась на 16,6 % и 46,7 % под влиянием кадмия и цинка соответственно. Добавление пектинов не смягчало негативного действия токсикантов, а, напротив, площадь листьев уменьшалась еще сильнее, на 6,5% на растворе с кадмием, и на 8,7% на растворе с цинком.

Внесение пектинов в среду с кадмием положительно сказывалось на удельной фотохимической активности хлоропластов, она повышалась на 14%, и на содержании органического углерода в надземной части (в 1,32 раза). Однако, на содержании пигментов фотосинтеза этот эффект не обнаружен: в присутствии пектинов у проростков снижалась концентрация всех пигментов по отношению к варианту с внесением только тяжелого металла, хлорофилла *a* на 11%, хлорофилла *b* на 8% и каротиноидов на 17%.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о невысокой эффективности применения пектинов при условии их внесения непосредственно в среду, содержащую тяжелые металлы и служащую для выращивания растений твердой пшеницы.

Литература:

1. Донченко Л.В., Фирсов Г.Г. Пектин: основные свойства, производство и применение. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 276 с.
2. Chand A., Chand P., Khatri G.G., Paudel D.R. (2021). Enhanced removal efficiency of arsenic and copper from aqueous solution using activated *Acorus calamus* based adsorbent. Chem. Biochem. Eng. Q., 35 (3), 279–293.

3. Shakoор, M.B., Niazi, N.K., Bibi I., Shahid M., Sharif, F., Bashir, S., Shaheen, S.M., Wang, H., Tsang, D.C.W., Ok, Y.S., Rinklebe, J. (2018). Arsenic removal by natural and chemically modified watermelon rind in aqueous solutions and groundwater. *Sci. Total Environ.*, 645 1444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.218>
4. Jakybik-Kolon, A., Bok-Badura, J., Karorn, K., Mitko, K.; Milewski, A. (2017). Hybrid pectin-based biosorbents for zinc ions removal. *Carbohydr. Polym.*, 169, 213-219.
5. Tarmizi, A.N.M., Ismail, N., Ahmad, H. (2018). Preliminary study on heavy metal removal and turbidity reduction from groundwater by using apple pectin (biofloculant). *Int. J. Environ. Eng.*, 9, 271-281.
6. Karim, A.; Raji, Z.; Karam, A.; Khalloufi, S. (2023). Valorization of fibrous plant-based food waste as biosorbents for remediation of heavy metals from wastewater – A Review. *Molecules*, 28, 4205. <https://doi.org/10.3390/molecules28104205>
7. Щербина И.А., Касьянов П.Ф., Бояр Е.В. Об определении площади листьев различных видов пшеницы // Биологические науки. - 1985. - № 5. - С. 105-108.
8. Третьяков Н.Н., Карнаухова Т.В., Паничкин Л.А. Практикум по физиологии растений. - М.: Агропромиздат, 1990. - С. 109-113.
9. Фотосинтез: Методические рекомендации к лабораторным занятиям, задания для самостоятельной работы и контроля знаний студентов / Авт.-сост. Л.В. Кахнович. – Мн.: БГУ, 2003. – 88 с.
10. Аликов Х.К. Фотоколориметрический метод определения содержания углерода в листьях мокрым сжиганием в хромовой смеси // Методы комплексного изучения фотосинтеза. Вып. 2. - Л., 1983. - С. 6-14.
11. Серегин И.В., Иванов В.Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. - 2001. - Т. 48. - № 4. - С.606-630.
12. Нестерова А.Н. Действие тяжелых металлов на корни растений. 1. Поступление свинца, кадмия и цинка в корни, локализация металлов и механизмы устойчивости растений // Биол. науки. - 1989. № 9. - С. 72-86.
13. Репкина Н.С., Нилова И.А., Казнина Н.М. Сравнительный анализ воздействия избытка цинка на рост побега *Sinapis alba* L. и *Brassica juncea* (L.) Czern. // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2022. – № 7. – С. 85-91.
14. Punz W.F., Sieghardt H. (1993). The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environ. Exp. Bot.* 33, 85-98.
15. Корнилов, А.А. Размеры листьев как показатель условия развития пшеницы // Доклады АН СССР. – 1951. – №4. – 23 с.
16. Венжик Ю.В., Титов А.Ф., Холопцева Е.С., Таланова В.В. Раздельное и совместное действие низкой температуры и кадмия на некоторые физиологические показатели пшеницы // Труды Карельского научного центра РАН. – 2015. – № 12. – С. 23-34.
17. Батова, Ю.В., Казнина, Н.М., Лайдинен, Г.Ф., Титов, А.Ф. Влияние кадмия на некоторые физиологические процессы у растений тимopheевки луговой (*Phleum pratense* L.) // Труды Карельского научного центра РАН. – 2013. – С. 52-58.
18. Meunier, N.; Blais, J.-F.; Tyagi, R.D. (2004). Removal of heavy metals from acid soil leachate using cocoa shells in a batch counter-current sorption process. *Hydrometallurgy*, 73, 225-235.

References:

1. Donchenko L.V., Firsov G.G. Pektin: osnovnye svoystva, proizvodstvo i primeneniye. – М.: DeLi print, 2007. – 276 s.
2. Chand A., Chand P., Khatri G. G., Paudel D. R. (2021). Enhanced removal efficiency of arsenic and copper from aqueous solution using activated *Acorus calamus* based adsorbent. *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 35 (3), 279–293.
3. Shakoор, M.B., Niazi, N.K., Bibi I., Shahid M., Sharif, F., Bashir, S., Shaheen, S.M., Wang, H., Tsang, D.C.W., Ok, Y.S., Rinklebe, J. (2018). Arsenic removal by natural and chemically modified watermelon rind in aqueous solutions and groundwater. *Sci. Total Environ.*, 645 1444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.218>
4. Jakybik-Kolon, A., Bok-Badura, J., Karorn, K., Mitko, K.; Milewski, A. (2017). Hybrid pectin-based biosorbents for zinc ions removal. *Carbohydr. Polym.*, 169, 213-219.
5. Tarmizi, A.N.M., Ismail, N., Ahmad, H. (2018). Preliminary study on heavy metal removal and turbidity reduction from groundwater by using apple pectin (biofloculant). *Int. J. Environ. Eng.*, 9, 271-281.

6. Karim, A.; Raji, Z.; Karam, A.; Khalloufi, S. (2023) Valorization of fibrous plant-based food waste as biosorbents for remediation of heavy metals from wastewater – A Review. *Molecules*, 28, 4205. <https://doi.org/10.3390/molecules28104205>
7. Shcherbina I.A., Kas'yanov P.F., Boyar E.V. Ob opredelenii ploshchadi list'ev razlichnyh vidov pshenicy // *Biologicheskie nauki*. - 1985. - № 5. - S. 105-108.
8. Tret'yakov N.N., Karnauhova T.V., Panichkin L.A. Praktikum po fiziologii rastenij. - M.: Agropromizdat, 1990. - S. 109-113.
9. Fotosintez: Metodicheskie rekomendacii k laboratornym zanyatiyam, zadaniya dlya samostoyatel'noj raboty i kontrolya znanij studentov / Avt.-sost. L.V. Kahnovich. – Mn.: BGU, 2003. – 88 s.
10. Alikov Kh.K. [Photocolorimetric method for determining the carbon content in leaves by wet burning in a chrome mixture]. *Metody kompleksnogo izuceniya fotosinteza [Methods of complex study of photosynthesis. Iss. 2]*. Leningrad, 1983, pp. 6-14. (In Russ.).
11. Seregin I.V., Ivanov V.B. Fiziologicheskie aspekty toksicheskogo dejstviya kadmiya i svinca na vysshie rasteniya // *Fiziologiya rastenij*. - 2001. - T. 48. - № 4. - S.606-630.
12. Nesterova A.N. Dejstvie tyazhelyh metallov na korni rastenij. 1. Postuplenie svinca, kadmiya i cinka v korni, lokalizaciya metallov i mekhanizmy ustojchivosti rastenij // *Biol. nauki*. 1989. № 9. S. 72-86.
13. Repkina N.S., Nilova I.A., Kaznina N.M. Sravnitel'nyj analiz vozdejstviya izbytka cinka na rost pobega *Sinapis alba* L. i *Brassica juncea* (L.) Czern. // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2022. – № 7. – S. 85-91.
14. Punz W.F., Sieghardt H. (1993). The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. *Environ. Exp. Bot.* 33, 85-98.
15. Kornilov, A.A. Razmery list'ev kak pokazatel' usloviya razvitiya pshenicy // *Doklady AN SSSR*. – 1951. – №4. – 23 s.
16. Venzhik Yu.V., Titov A.F., Holopceva E.S., Talanova V.V. Razdel'noe i sovmestnoe dejstvie nizkoj temperatury i kadmiya na nekotorye fiziologicheskie pokazateli pshenicy // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. – 2015. – № 12. – S. 23-34.
17. Batova, Yu.V., Kaznina, N.M., Lajdinen, G.F., Titov, A.F. Vliyanie kadmiya na nekotorye fiziologicheskie processy u rastenij timofeevki lugovoj (*Phleum pratense* L.) // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. – 2013. – S. 52-58.
18. Meunier, N.; Blais, J.-F.; Tyagi, R.D. (2004). Removal of heavy metals from acid soil leachate using cocoa shells in a batch counter-current sorption process. *Hydrometallurgy*, 73, 225-235.