

УДК 577.175.1:576.353

Александр Николаевич Тарасюк

канд. биол. наук, доц., зав. каф. зоологии и генетики

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Alexander Tarasiuk

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,

Head of the Department of Zoology and Genetics

of Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: tarasiuk01@yandex.ru

**ПРОТЕКТОРНЫЕ СВОЙСТВА ЭПИКАСТАСТЕРОНА
И ЕГО КОНЬЮГАТОВ С КИСЛОТАМИ
ПО ОТНОШЕНИЮ К ТОКСИЧЕСКОМУ ДЕЙСТВИЮ ИОНОВ СВИНЦА И КАДМИЯ
НА КЛЕТКИ КОРНЕВОЙ МЕРИСТЕМЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР***

Исследовано влияние brassinosterоида 24-эпикастастерона и его конъюгатов с органическими кислотами на митотическую активность клеток корневой меристемы проростков гречихи и гороха в условиях токсического действия ионов свинца и кадмия. Показано, что данные соединения в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} и 10^{-7} М значительно повышают митотическую активность клеток при предварительной обработке семян, предшествующей воздействию ионов свинца и кадмия, снижающему этот показатель. Полученные результаты свидетельствуют о том, что 24-эпикастастерон и его конъюгаты обладают выраженными протекторными свойствами по отношению к токсическому действию ионов свинца и кадмия.

Ключевые слова: brassinosterоиды, 24-эпикастастерон, конъюгаты brassinosterоидов с кислотами, тяжелые металлы, митотическая активность, протекторные свойства.

Protective Properties of Epicastasterone and its Conjugates with Acids in Relation to the Toxic Effect of Lead and Cadmium Ions on the Cells of the Root Meristem of Agricultural Crops

The influence of the brassinosteroid 24-epicastasterone and its conjugates with organic acids on the mitotic activity of the cells of the root meristem of buckwheat and pea seedlings under the toxic action of lead and cadmium ions was studied. It was shown that these compounds at concentrations of 10^{-9} , 10^{-8} , and 10^{-7} M significantly increase the mitotic activity of cells during seed pretreatment prior to exposure to lead and cadmium ions, which reduces this indicator. The results obtained indicate that 24-epikastasterone and its conjugates have pronounced protective properties in relation to the toxic effects of lead and cadmium ions.

Key words: brassinosteroids, 24-epicastasterone, conjugates of brassinosteroids with acids, heavy metals, mitotic activity, protective properties.

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительное возрастание степени загрязнения окружающей среды потенциально токсическими элементами вследствие быстрого развития промышленности, резкого увеличения числа автотранспортных средств, возрастания количества вносимых в почву минеральных удобрений. Наиболее распространенными и опасными из них являются тяжелые металлы (ТМ) [1]. Накапливаясь в растениях, ТМ приводят к угнетению различных физиологических процессов и, как следствие, к существенному снижению урожайности сельскохозяйственных культур и устойчивости их к действию неблагоприятных факторов среды и болезням. В связи с этим проблема повышения устойчивости растений к действию ТМ является актуальной и имеет большое практическое значение [2].

**Работа выполнена в рамках НИР «Оценка влияния природных brassinosterоидов и их конъюгатов с кислотами на морфометрические и физиолого-биохимические параметры сельскохозяйственных и декоративных растений» подпрограммы «Химические основы процессов жизнедеятельности» (Биооргхимия) ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия» на 2021–2025 гг. (№ госрегистрации 20211450 от 20.05.2021 г.).*

Одним из наиболее общих и легко регистрируемых проявлений токсичности ТМ для растений является замедление ростовых процессов, что связано с их прямым действием на деление клеток [3]. Известно, что наиболее интенсивно деление клеток происходит в апикальных меристемах корня и побега, а формирование всех органов растения связано в первую очередь с функционированием меристематических клеток. Изучение митотической активности клеток меристемы корня у разных видов растений (гороха, лука, ячменя, *Crepis capillaries*, *Lathyrus odoratus*) показало, что в присутствии ТМ в высоких концентрациях замедляется интенсивность клеточных делений, уменьшается количество клеток на всех фазах митоза, увеличивается продолжительность отдельных фаз и всего митотического цикла [4].

В меристематических клетках корней высокие концентрации ТМ также приводят к цитогенетическим нарушениям, таким как, например, спирализация хромосом, неравное их расхождение к полюсам клетки или полное отсутствие расхождения, появление тетраплоидных клеток [5; 6]. В основе всех отмеченных выше нарушений клеточного деления, прежде всего, лежит способность связывания ионов металлов с сульфгидрильными группами белков веретена деления и ферментов, ответственных за прохождение митоза, в результате чего они теряют свою активность [7; 8].

Для повышения устойчивости растений к действию ТМ могут быть использованы биологически активные вещества, к числу которых относятся брассиностероиды (БС). Для этих соединений установлено стресс-протекторное действие, проявляющееся в повышении устойчивости растений к засухе, анаэробнозису, засолению, полеганию и др. [9].

В то же время число веществ этого класса, обладающих значительной стресс-протекторной активностью, весьма ограничено [9; 10]. В связи с этим важной задачей является поиск новых веществ из класса БС, обладающих протекторным действием по отношению к ТМ. К числу таких веществ относятся конъюгаты брассиностероидов с кислотами, действие которых на растительные организмы остается малоизученным.

Целью данного исследования является оценка протекторного действия 24-эпикастастерона и его конъюгатов с салициловой и индолилуксусной кислотами по отношению к токсическому действию ионов свинца и кадмия на клетки корневой меристемы гречихи и гороха.

Материалы и методы

Для оценки протекторного действия 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами по отношению к токсическому действию ТМ на клетки корневой меристемы сельскохозяйственных культур были использованы следующие соединения:

- 24-эпикастастерон (ЭК);
- 2-моносалицилат 24-эпикастастерона (S23);
- тетраиндолилацетат 24-эпикастастерона (S31);
- нитрат кадмия $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$;
- нитрат свинца $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$.

Исследования проводились на двух сельскохозяйственных культурах: гречихе посевной *Fagopyrum esculentum* Moench., сорт Влада и горохе посевном *Pisum sativum* L., сорт Саламанка.

Выбор концентраций действующих веществ осуществлялся на основе оценочных опытов по влиянию 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами, а также нитратов кадмия и свинца на всхожесть, энергию прорастания и начальные этапы роста. Были использованы следующие концентрации:

1) для 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами – 10^{-7} , 10^{-8} и 10^{-9} М (исследованные более высокие концентрации обладают ингибирующим действием, а более

низкие содержат столь незначительные количества действующих веществ, что возможные наблюдаемые эффекты трудно объяснить их влиянием);

2) для соединений ТМ: нитрата свинца – 10^{-2} М (гречиха) и 10^{-3} М (горох), нитрата кадмия – 10^{-3} М (гречиха) и 10^{-4} М (горох) (исследованные более высокие концентрации практически полностью ингибируют прорастание семян, а более низкие – незначительно угнетают прорастание семян и рост корешков).

Воздействие осуществлялось путем замачивания семян в течение 5 ч в растворах БС, а затем в течение 5 ч в растворах нитратов свинца и кадмия. Для оценки влияния ионов свинца и кадмия без воздействия БС семена замачивали в течение 5 ч в воде, а затем в течение 5 ч в растворах нитратов свинца и кадмия. Были использованы следующие варианты опыта:

- 1) дистиллированная вода (контроль);
- 2) раствор $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией 10^{-2} М для гречихи и 10^{-3} М для гороха;
- 3) раствор $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ с концентрацией 10^{-3} М для гречихи и 10^{-4} М для гороха;
- 4) растворы ЭК с концентрациями 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М + раствор $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией 10^{-2} М для гречихи и 10^{-3} М для гороха;
- 5) растворы S23 с концентрациями 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М + раствор $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией 10^{-2} М для гречихи и 10^{-3} М для гороха;
- 6) растворы S31 с концентрациями 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М + раствор $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией 10^{-2} М для гречихи и 10^{-3} М для гороха;
- 7) растворы ЭК с концентрациями 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М + раствор $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ с концентрацией 10^{-3} М для гречихи и 10^{-4} М для гороха;
- 8) растворы S23 с концентрациями 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М + раствор $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ с концентрацией 10^{-3} М для гречихи и 10^{-4} М для гороха;
- 9) растворы S31 с концентрациями 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М + раствор $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ с концентрацией 10^{-3} М для гречихи и 10^{-4} М для гороха.

Проращивание семян гречихи посевной и гороха посевного проводили согласно ГОСТу 12038–84 [11].

По достижении корешками длины 1,5–2 см, примерно через 2–3 суток после начала проращивания, их фиксировали в свежеприготовленном спиртукусном (3:1) фиксаторе в количестве не менее 20 корешков на вариант опыта. Цитологические препараты корневой меристемы готовили общепринятым ацетоорсеиновым методом [12].

Анализ препаратов с целью определения митотической активности осуществляли на микроскопе Микмед-5 при увеличении 15×40 .

В каждом варианте опыта анализировали не менее 2 000 клеток с препаратов 4–5 корешков. Для каждого корешка в трех полях зрения проводили подсчет числа клеток, находящихся на стадиях интерфазы (И), профазы (П), метафазы (М), анафазы (А) и телофазы (Т) соответственно. В качестве показателя митотической активности клеток использовали митотический индекс (МИ), измеряемый в промилле (‰), который рассчитывали по следующей формуле (1) [12]:

$$МИ = \frac{П + М + А + Т}{П + М + А + Т + И} \cdot 1000. \quad (1)$$

Статистическую обработку проводили по общепринятым методикам, согласно П. Ф. Рокицкому [13], с использованием программы Microsoft Excel. Для оценки достоверности различий был применен t-критерий Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований установлено, что при действии ионов свинца и кадмия наблюдается снижение митотической активности клеток корневой меристемы гречихи относительно контроля (таблицы 1, 2). При этом наиболее выраженный ингибирующий эффект демонстрирует нитрат свинца в концентрации 10^{-2} М – митотический индекс составляет 23,1 % по отношению к контролю (различия достоверны при $P \leq 0,001$). При действии нитрата кадмия митотический индекс клеток корневой меристемы гречихи снижается не столь значительно и составляет 87,2 % к контролю (различия недостоверны).

Предварительная обработка БС семян гречихи, предшествующая воздействию нитратов свинца и кадмия, в большинстве случаев приводит к увеличению значений митотического индекса по сравнению с результатами обработки семян только нитратами свинца и кадмия (таблицы 1, 2; рисунки 1, 2).

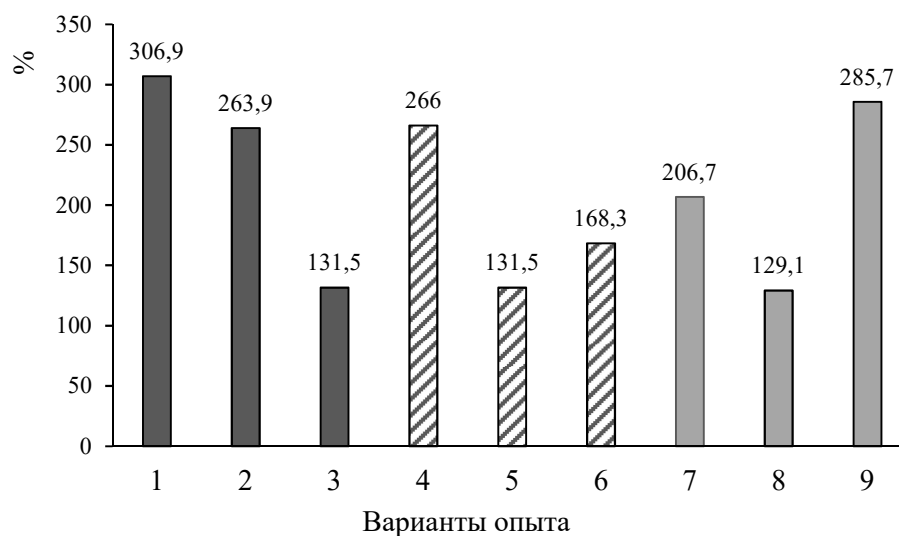
Максимальный эффект при этом отмечается при предварительной обработке БС, предшествующей воздействию ионов свинца: во всех вариантах опыта различия достоверны при $P \leq 0,001$. Наилучшие результаты показывает предварительная обработка ЭК 10^{-9} М – 406,9 %, S31 10^{-7} М – 385,7 %, S23 10^{-9} М – 366,0 % по отношению к варианту $Pb(NO_3)_2$ 10^{-2} М.

В результате предварительной обработки БС семян гречихи, предшествующей воздействию ионов кадмия, достоверный (при $P \leq 0,01$) положительный эффект отмечается для S23 и S31 в концентрации 10^{-9} М (митотический индекс увеличивается на 38,5 и 38,7 % соответственно). В остальных случаях увеличение значений митотического индекса не является достоверным.

Таблица 1 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов с кислотами на митотическую активность клеток корневой меристемы гречихи при воздействии ионов свинца

Вариант опыта	Митотический индекс	
	‰	% к контролю
Контроль	$63,84 \pm 4,17$	100,0
$Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$14,72 \pm 1,36^{***}$	23,1
		% к $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М
$Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$14,72 \pm 1,36$	100,0
24-эпикастерон		
ЭК, 10^{-9} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$59,89 \pm 3,90^{***}$	406,9
ЭК, 10^{-8} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$53,56 \pm 1,79^{***}$	363,9
ЭК, 10^{-7} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$34,08 \pm 4,23^{***}$	231,5
2-моносалицилат 24-эпикастерона		
S23, 10^{-9} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$53,87 \pm 3,61^{***}$	366,0
S23, 10^{-8} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$34,11 \pm 1,87^{***}$	231,7
S23, 10^{-7} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$39,49 \pm 2,98^{***}$	268,3
тетраиндолилацетат 24-эпикастерона (S31)		
S31, 10^{-9} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$45,15 \pm 4,19^{***}$	306,7
S31, 10^{-8} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$33,72 \pm 2,84^{***}$	229,1
S31, 10^{-7} М + $Pb(NO_3)_2$, 10^{-2} М	$56,77 \pm 3,91^{***}$	385,7

Примечание – *** – достоверно при $P \leq 0,001$.



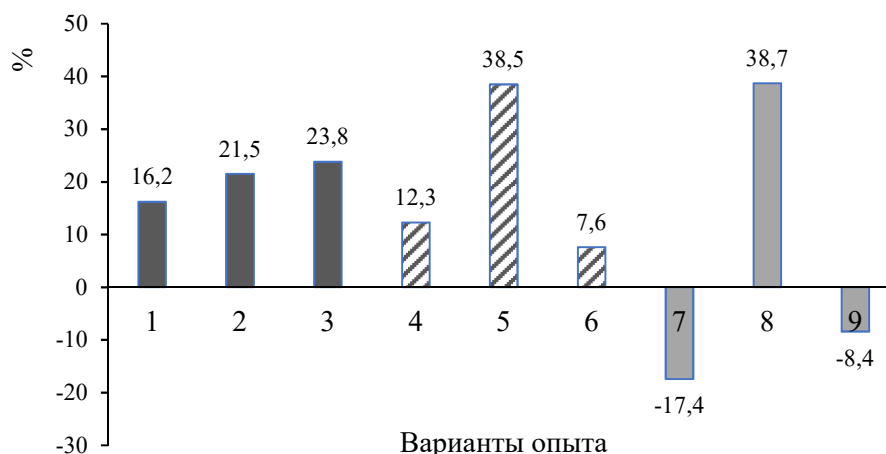
1, 2, 3 – ЭК в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 4, 5, 6 – S23 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 7, 8, 9 – S31 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М.

Рисунок 1 – Влияние обработки семян 24-эпикастероном и его конъюгатами с кислотами, предшествующей воздействию $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 10^{-2} М, на митотический индекс клеток корневой меристемы гречиши, % относительно варианта опыта с воздействием $Pb(NO_3)_2$

Таблица 2 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов с кислотами на митотическую активность клеток корневой меристемы гречиши при воздействии ионов кадмия

Вариант опыта	Митотический индекс	
	%	% к контролю
Контроль	$63,84 \pm 4,17$	100,0
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$55,64 \pm 4,36$	87,2
		% к $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$55,64 \pm 4,36$	100,0
24-эпикастерон		
ЭК, 10^{-9} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$64,63 \pm 5,13$	116,2
ЭК, 10^{-8} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$67,58 \pm 5,04$	121,5
ЭК, 10^{-7} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$68,87 \pm 6,96$	123,8
2-моносалицилат 24-эпикастерона		
S23, 10^{-9} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$62,51 \pm 5,04$	112,3
S23, 10^{-8} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$77,06 \pm 4,82^{**}$	138,5
S23, 10^{-7} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$59,86 \pm 5,15$	107,6
тетраиндолилацетат 24-эпикастерона (S31)		
S31, 10^{-9} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$45,98 \pm 4,89$	82,6
S31, 10^{-8} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$77,15 \pm 4,28^{**}$	138,7
S31, 10^{-7} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-3} М	$50,94 \pm 4,52$	91,6

Примечание – ** – достоверно при $P \leq 0,01$.



1, 2, 3 – ЭК в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 4, 5, 6 – S23 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 7, 8, 9 – S31 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М.

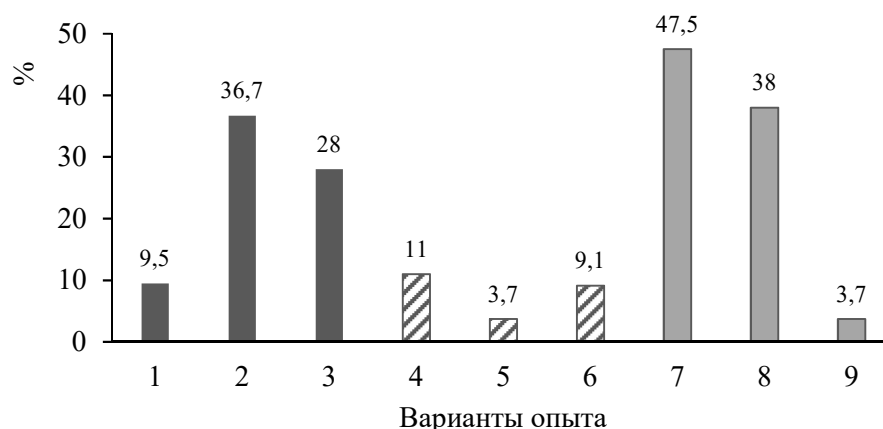
Рисунок 2 – Влияние обработки семян 24-эпикастероном и его конъюгатами с кислотами, предшествующей воздействию $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в концентрации 10^{-3} М, на митотический индекс клеток корневой меристемы гречихи, % относительно варианта опыта с воздействием $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Воздействие ионов свинца и кадмия на семена гороха также приводит к снижению митотической активности клеток корневой меристемы проростков. Так, при действии $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ в концентрации 10^{-3} М, митотический индекс составляет 68,1 % по отношению к контролю (достоверно при $P \leq 0,001$) (таблица 3), а при действии $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в концентрации 10^{-4} М этот показатель также достоверно (при $P \leq 0,001$) снижается до уровня 60,5 % по сравнению с контролем (таблица 4). Обработка семян гороха растворами БС, предшествующая воздействию ионов свинца и кадмия, приводит к увеличению митотической активности клеток корневой меристемы (таблицы 3, 4; рисунки 3, 4).

Таблица 3 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов с кислотами на митотическую активность клеток корневой меристемы гороха при воздействии ионов свинца

Вариант опыта	Митотический индекс	
	%	% к контролю
Контроль	$93,15 \pm 5,44$	100,0
$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$63,44 \pm 5,16^{***}$	68,1
		% к $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М
$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$63,44 \pm 5,16$	100,0
24-эпикастерон		
ЭК, 10^{-9} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$69,47 \pm 5,62$	109,5
ЭК, 10^{-8} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$86,78 \pm 5,78^{**}$	136,7
ЭК, 10^{-7} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$81,22 \pm 6,98$	128,0
2-моносалицилат 24-эпикастерона		
S23, 10^{-9} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$70,42 \pm 4,28$	111,0
S23, 10^{-8} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$65,82 \pm 4,48$	103,7
S23, 10^{-7} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$69,21 \pm 5,88$	109,1
тетраиндолилацетат 24-эпикастерона (S31)		
S31, 10^{-9} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$93,56 \pm 2,37^{***}$	147,5
S31, 10^{-8} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$87,56 \pm 2,79^{***}$	138,0
S31, 10^{-7} М + $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 10^{-3} М	$65,80 \pm 3,68$	103,7

Примечание – ** – достоверно при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.



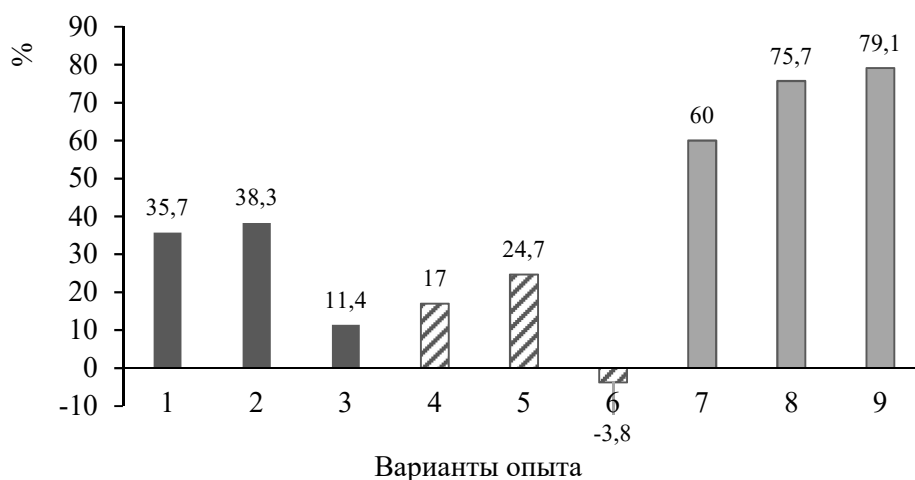
1, 2, 3 – ЭК в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 4, 5, 6 – S23 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 7, 8, 9 – S31 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М.

Рисунок 3 – Влияние обработки семян 24-эпикастероном и его конъюгатами с кислотами, предшествующей воздействию $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 10^{-3} М, на митотический индекс клеток корневой меристемы гороха, % относительно варианта опыта с воздействием $Pb(NO_3)_2$

Таблица 4 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов с кислотами на митотическую активность клеток корневой меристемы гороха при воздействии ионов кадмия

Вариант опыта	Митотический индекс	
	%	% к контролю
Контроль	$93,15 \pm 5,44$	100,0
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$56,31 \pm 5,37^{***}$	60,5
		% к $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$56,31 \pm 5,37$	100,0
24-эпикастерон		
ЭК, 10^{-9} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$76,40 \pm 9,60$	135,7
ЭК, 10^{-8} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$77,86 \pm 4,05^{**}$	138,3
ЭК, 10^{-7} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$62,74 \pm 5,21$	111,4
2-моносалицилат 24-эпикастерона		
S23, 10^{-9} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$65,87 \pm 5,35$	117,0
S23, 10^{-8} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$70,23 \pm 8,26$	124,7
S23, 10^{-7} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$54,19 \pm 5,10$	96,2
тетраиндолилацетат 24-эпикастерона (S31)		
S31, 10^{-9} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$89,91 \pm 4,38^{***}$	160,0
S31, 10^{-8} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$98,92 \pm 3,45^{***}$	175,7
S31, 10^{-7} М + $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, 10^{-4} М	$100,86 \pm 3,08^{***}$	179,1

Примечание – ** – достоверно при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.



1, 2, 3 – ЭК в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 4, 5, 6 – S23 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М; 7, 8, 9 – S31 в концентрациях 10^{-9} , 10^{-8} , 10^{-7} М.

Рисунок 4 – Влияние обработки семян 24-эпикастероном и его конъюгатами с кислотами, предшествующей воздействию $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в концентрации 10^{-4} М, на митотический индекс клеток корневой меристемы гороха, % относительно варианта опыта с воздействием $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Достоверные эффекты на фоне воздействия ионов свинца выявлены при предварительной обработке ЭК 10^{-8} М, S31 10^{-8} М, S31 10^{-9} М: митотический индекс увеличивается на 36,7, 47,5 и 38 % соответственно.

Предварительная обработка ЭК 10^{-8} М, S31 10^{-9} М, S31 10^{-8} М, S31 10^{-7} М, предшествующая воздействию нитрата кадмия, также приводит к достоверному увеличению митотического индекса соответственно на 38,3, 60, 75,7 и 79,1 %.

Заключение

Проведено исследование протекторного действия 24-эпикастерона и его конъюгатов с биологически значимыми органическими кислотами (салициловой и индолилуксусной) по отношению к токсическому действию ионов свинца и кадмия на клетки корневой меристемы проростков гречихи и гороха.

Установлено, что исследуемые соединения значительно повышают значения митотического индекса клеток при предварительной обработке семян, предшествующей воздействию ионов свинца и кадмия, по сравнению с результатами действия ионов свинца и кадмия без предварительной обработки БС. Это означает, что они обладают выраженным протекторным действием и защищают растения от негативного влияния соединений ТМ. Наибольшую эффективность для гречихи проявляют ЭК и S23 в концентрации 10^{-9} и S31 в концентрации 10^{-7} М при воздействии ионов свинца, S23 и S31 в концентрации 10^{-8} М при воздействии ионов кадмия; для гороха – S31 в концентрациях 10^{-9} и 10^{-8} М при воздействии ионов свинца, S31 в концентрациях 10^{-8} и 10^{-7} М при воздействии ионов кадмия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Дерягин. – Саратов : Ракурс, 2017. – 178 с.

2. Казнина, Н. М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства Роасеа к тяжелым металлам : дис. ... д-ра биол. наук : 03.01.05 / Н. М. Казнина. – Петрозаводск, 2005. – 385 л.
3. Устойчивость растений к тяжелым металлам / А. Ф. Титов [др.] ; под. общ. ред. А. Ф. Титова. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2007. – 170 с.
4. Серегин, И. В. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения / И. В. Серегин, В. Б. Иванов // Физиология растений. – 2001. – Т. 48, № 4. – С. 606–630.
5. Довгалиук, А. И. Цитогенетические эффекты солей токсичных металлов в клетках апикальной меристемы корней проростков *Allium cepa* L. / А. И. Довгалиук, Т. Б. Калиняк, Я. Б. Блюм // Цитология и генетика. – 2001. – Т. 35, № 2. – С. 3–10.
6. Демченко, Н. П. Влияние никеля на рост, пролиферацию и дифференциацию клеток корневой меристемы проростков *Triticum aestivum* / Н. П. Демченко, И. Б. Калимова, К. Н. Демченко // Физиология растений. – 2005. – Т. 52, № 2. – С. 250–258.
7. Иванов, В. Б. Сравнение влияния тяжелых металлов на рост корня в связи с проблемой специфичности и избирательности их действия / В. Б. Иванов, Е. И. Быстрова, И. В. Серегин // Физиология растений. – 2003. – Т. 50, № 3. – С. 445–454.
8. Серегин, И. В. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения / И. В. Серегин, А. Д. Кожевникова // Физиология растений. – 2006. – Т. 53, № 2. – С. 285–308.
9. Хрипач, В. А. Брассиностероиды / В. А. Хрипач, Ф. А. Лахвич, В. Н. Жабинский. – Минск : Наука и техника, 1993. – 287 с.
10. Биологическая активность брассиностероидов и стероидных гликозидов / С. Э. Кароза [и др.] ; под общ. ред. С. Э. Карозы. – Брест : БрГУ, 2019. – 261 с.
11. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Межгосударственный стандарт : ГОСТ 12038–84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартинформ, 2011. – 29 с.
12. Паушева, З. П. Практикум по цитологии растений / З. П. Паушева. – М. : Агропромиздат, 1988. – 271 с.
13. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Выш. шк. 1973. – 320 с.

REFERENCES

1. Miedviediev, I. F. Tiazholyje mietally v ekosistiemakh / I. F. Miedviediev, S. S. Die-riagin. – Saratov : Rakurs, 2017. – 178 s.
2. Kaznina, N. M. Fiziologo-biokhimichieskije i moliekuliarno-gienetichieskije miekhanizmy ustojchivosti rastienij siemiejstva Poacea k tiazholym mietallam : dis. ... d-ra biol. nauk : 03.01.05 / N. M. Kaznina. – Pietrozavodsk, 2005. – 385 l.
3. Ustojchivost' rastienij k tiazholym mietallam / A. F. Titov [dr.] ; pod. obshch. ried. A. F. Titova. – Pietrozavodsk : KarNTS RAN, 2007. – 170 s.
4. Sieriogin, I. V. Fiziologichieskije aspiekty toksichieskogo diejstvija kadmija i svinca na vysshije rastienija / I. V. Sieriogin, V. B. Ivanov // Fiziologija rastienij. – 2001. – T. 48, № 4. – S. 606–630.
5. Dovgaliuk, A. I. Citogienetichieskije effiekty solej toksichnykh mietallov v kletkakh apikal'noj meristiemy korniej prorostkov *Allium cepa* L. / A. I. Dovgaliuk, T. B. Kaliniak, Ya. B. Blium // Citologija i gienetika. – 2001. – T. 35, № 2. – S. 3–10.
6. Diemchienko, N. P. Vlijanije nikielia na rost, proliferaciju i diffierenciaciju klietok kornievoj mieristiemy prorostkov *Triticum aestivum* / N. P. Diemchienko, I. B. Kalimova, K. N. Diemchienko // Fiziologija rastienij. – 2005. – T. 52, № 2. – S. 250–258.

7. Ivanov, V. B. Sravnienie vlijanija tiazholykh mietallov na rost kornia v sviazi s problemoj specifichnosti i izbiratel'nosti ikh diejstvija / V. B. Ivanov, Ye. I. Bystrova, I. V. Sieriogin // Fiziologija rastienij. – 2003. – T. 50, № 3. – S. 445–454.
8. Sieriogin, I. V. Fiziologichieskaja rol' nikielia i jego toksichieskoje diejstvij na vysshije rastienija / I. V. Sieriogin, A. D. Kozhevnikova // Fiziologija rastienij. – 2006. – T. 53, № 2. – S. 285–308.
9. Khripach, V. A. Brassinostieroidy / V. A. Khripach, F. A. Lakhvich, V. N. Zhabinskij. – Minsk : Nauka i tiekhnika, 1993. – 287 s.
10. Biologichieskaja aktivnost' brassinostieroidov i stieroidnykh glikozidov / S. E. Karoza [i dr.] ; pod obshch. ried. S. E. Karozy. – Brest : BrGU, 2019. – 261 s.
11. Siemiena siel'skokhoziajstviennykh kul'tur. Mietody opriedielienija vskhozhesti. Miezhgosudarstviennyj standart : GOST 12038–84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.
12. Pausheva, Z. P. Praktikum po citologii rastienij / Z. P. Pausheva. – M. : Agropromizdat, 1988. – 271 s.
13. Rokickij, P. F. Biologichieskaja statistika / P. F. Rokickij. – Minsk : Vysh. shk., 1973. – 320 s.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 16.01.2023