

УДК 632.154:57.085:042.5

Оксана Владимировна Корзюк

ст. преподаватель каф. химии

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Aksana Karziuk

Senior Lecturer of the Department of Chemistry of Brest State A. S. Pushkin University

e-mail: chem@brsu.brest.by

ПРОТЕКТОРНОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭПИКАСТАСТЕРОНА И ЕГО КОНЬЮГАТОВ С КИСЛОТАМИ НА РАСТЕНИЯ ГОРОХА ПОСЕВНОГО В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ИОНОВ СВИНЦА*

Проведенная оценка влияния 24-эпикастастерона (ЭК) и его конъюгатов с кислотами на морфометрические и физиолого-биохимические показатели гороха посевного сорта Саламанка в условиях воздействия ионов свинца подтверждает их биологическую активность, установленную с помощью стандартной методики проращивания по ГОСТу 12038–84. Статистически подтверждено, что применение 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами для защиты растений при загрязнении окружающей среды свинцом возможно. Использование определенных концентраций 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами стимулирует рост и развитие гороха посевного.

Ключевые слова: brassinosteroids, 24-эпикастастерон, эфиры ЭК с кислотами (конъюгаты), горох, рострегулирующая активность, фотосинтетические пигменты, содержание белка, ионы свинца.

Protective Effect of Epicastasterone and its Conjugates with Acid on Pea Plants Under the Influence of Lead Ions

The evaluation of the effect of 24-epicastasterone (EC) and its conjugates with acids on morphometric and physiological and biochemical parameters of pea under the influence of lead ions confirms their biological activity established by the standard method of germination according to State Standard 12038-84. It is statistically confirmed that the use of 24-epicastasterone and its conjugates with acids for plant protection under environmental lead pollution is possible. The use of certain concentrations of 24-epicastasterone and its conjugates with acids stimulates the growth and development of pea plants.

Key words: brassinosteroids, 24-epicastasterone, EC acid esters (conjugates), pea, growth-regulating activity, photosynthetic pigments, protein content, lead ions.

Введение

Поиск новых эффективных регуляторов роста в сельском хозяйстве активно ведется с целью повышения продуктивности и устойчивости растений к неблагоприятным факторам произрастания, стимуляции плодо- и корнеобразования, улучшения биохимического состава плодов и увеличения сроков их хранения.

В последнее время стало заметно, что постоянное воздействие техногенного загрязнения на сельскохозяйственные растения обуславливает накопление токсических веществ, в т. ч. и тяжелых металлов. Свинец является опасным загрязнителем окружающей среды, т. к. этот металл широко используется в промышленности и относится к I классу опасности. В условиях изменения климата и антропогенного химического загрязнения биосферы данный стрессор является одним из важнейших агентов, снижающих урожайность и качество растениеводческой продукции [1]. В растениях в биологически важных обменных процессах он не участвует и является абсолютным токсикантом. Избыток свинца является токсичным и вызывает такие симптомы, как повреждение мембран, изменение активности ферментов, ингибирует процесс дыхания и подавляет фотосинтез [2].

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

Свинец в достаточно высокой концентрации тормозит прорастание семян, замедляет рост корней в длину, а также образование корневых волосков. У листьев отравленных свинцом растений наблюдается хлороз, часто между жилками. Особенно сильно поражаются молодые листья. Повышенное содержание свинца вызывает функциональные нарушения в пигментных комплексах и уменьшение содержания хлорофилла в тканях [3].

Наряду с традиционными методами повышения продуктивности в настоящее время активно развивается новое направление, основанное на использовании биологически активных веществ для стимуляции роста, развития и повышения иммунитета растений. Одним из таких новых агрономических решений для растениеводства может быть использование рострегулирующих препаратов на основе брассиностероидов (БС), которые играют важную роль в регуляции многих физиологических процессов у растений [4]. Известно, что они изменяют активность ферментов, мембранный потенциал, активируют синтез белков и нуклеиновых кислот, регулируют метаболизм аминокислот и жирных кислот, влияют на гормональный статус растительного организма, стимулируют растяжение и деление клеток. В то же время БС обладают стрессоустойчивыми и адаптогенными свойствами, которые повышают резистентность ко многим повреждающим воздействиям [5]. Среди преимуществ БС можно отметить их способность вызывать эффекты антистрессового действия в чрезвычайно низких концентрациях по сравнению с другими гормонами [6]. Выявление наиболее эффективных регуляторов роста, оптимальных способов их использования является актуальной задачей современной агрохимии.

Целью данного исследования является исследование биологической активности 24-эпикастерона и его конъюгатов с кислотами на основные морфометрические и физиолого-биохимические параметры гороха посевного условия влияния ионов свинца, т. к. производство экологически безопасной продукции, которая будет соответствовать установленным общегигиеническим, токсикологическим нормативам, не влияющей негативно на здоровье человека, – первоочередное требование.

Материалы и методы

Для изучения влияния биологической активности 24-эпикастерона (ЭК) и его конъюгатов с кислотами был выбран горох посевной (*Pisum sativum* L), сорта Саламанка, 1-ой репродукции. Выбор семян был обусловлен тем, что, из возделываемых видов гороха в Беларуси горох посевной имеет высокую урожайность и пригоден для промышленной переработки, может быть использован для приготовления высококачественного зерна [7]. Сорт раннеспелый, детерминированный, вегетационный период составляет 63–87 дней. Высота растений – 44–103 см. Среднезасухоустойчив. Сорт отличается дружным созревaniem, имеет хороший стартовый рост, устойчивость к осыпанию высокая. Устойчив к полеганию. Масса 1 000 семян составляет 185–250 г. Содержание белка в зерне – 23,4–26,3 %.

Для изучения рострегулирующего и протекторного действия 24-эпикастерона и его конъюгатов с кислотами – 2-моноацетилат 24-эпикастерона (S23) и тетраацетилат 24-эпикастерона (S31) – на семена гороха посевного сорта Саламанка в условиях токсичных концентраций ионов свинца были использованы следующие варианты опыта:

- 1) вода (контроль);
- 2) БС с оптимальной концентрацией, оказывающей рострегулирующую активность на растение: ЭК с концентрацией 10^{-9} М; S23 с концентрацией 10^{-11} М; S31 с концентрацией 10^{-9} М;
- 3) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ с концентрациями 10^{-4} – 10^{-3} М;
- 4) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ с концентрацией 10^{-4} – 10^{-3} М + БС с оптимальной концентрацией.

Устойчивость гороха посевного к ионам свинца (лабораторный опыт) устанавливалась на 10-е сутки по морфометрическим параметрам растений гороха посевного (средняя длина, масса корней и побегов). Проращивание семян осуществлялось согласно ГОСТу 12038–84 [8]. Все опыты проводились в четырехкратной повторности.

Следующий этап исследований был связан с оценкой протекторного действия гормонов в отношении потенциально токсичных ионов свинца на морфометрические параметры гороха посевного, выращенного в почвогрунте («Хозяин», РБ (азот общий – 5 795 мг/кг, калий общий – 3 223 мг/кг, фосфор общий – 1 838 мг/кг, Cu – 6,15 мкг/кг, Zn – 24 мкг/кг)) в ходе вегетационного лабораторного опыта [9]. Семена гороха замачивались на 5 ч. в дистиллированной воде, а затем проращивались с добавлением раствора нитрата свинца с концентрацией 10^{-4} и 10^{-3} М. Опытные образцы поливались раствором $Pb(NO_3)_2$ с соответствующей концентрацией. Контролем являлся вариант без внесения раствора $Pb(NO_3)_2$. Растения выращивались в условиях постоянной влажности почвы. Вегетационные емкости передвигались ежедневно по схеме, обеспечивающей однородные условия роста и развития растений. На 20-ые сутки были исследованы морфометрические параметры растений гороха посевного (средняя длина, масса корней и побегов).

Для определения содержания фотосинтетических пигментов использовался спектрофотометрический метод [10]. Он, несмотря на свою простоту, позволяет в одной пробе определить концентрацию различных видов хлорофилла. Определение концентрации фотосинтетических пигментов включает следующие процедуры: получение навески листьев, экстракцию пигментов растворителем (ацетоном) и спектрофотометрический анализ при различных длинах волн. Для лабораторного эксперимента в качестве растворителя был выбран 100 %-ый ацетон. Для расчета концентрации хлорофиллов а, b и каротиноидов в вытяжке пигментов определяли оптическую плотность экстракта на спектрофотометре при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения определяемых пигментов в данном растворителе: $\lambda = 662, 644$ и $440,5$ нм. Концентрацию пигментов рассчитывали по формулам (1–4):

$$C_{\text{хл а}} = 9,784 D_{662} - 0,990 D_{644}; \quad (1)$$

$$C_{\text{хл b}} = 21,426 D_{644} - 4,650 D_{662}; \quad (2)$$

$$C_{\text{хл а}} + C_{\text{хл b}} = 5,134 D_{662} + 20,436 D_{644}; \quad (3)$$

$$C_{\text{кар.}} = 4,695 D_{440,5} - 0,268 C_{\text{хл а}} + C_{\text{хл b}}. \quad (4)$$

Сначала вычисляется концентрация пигментов (C) в экстракте по приведенным выше формулам в мг/л. Затем содержание пигментов на грамм сырой массы рассчитывается по формуле (5):

$$A = V * C / 1000 * P, \quad (5)$$

где C – концентрация пигментов, мг/л;

V – объем вытяжки, мл;

P – навеска растительного материала, г.

Содержание белка определялось спектрофотометрически по методу Лоури [11]. Метод основан на реакции реактива Фолина с фенольными радикалами некоторых аминокислот, входящих в состав белков, в результате которой образуются соединения, придающие синюю окраску раствору белка.

Статистическую обработку всех полученных результатов проводили по общепринятым методикам биологической статистики согласно П.Ф. Рокицкому [12] с использованием программы Microsoft Excel и t-критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что ионы свинца в концентрации 10^{-3} М приводили к уменьшению длины корня на 40,0 % и массы корня на 13,6 % по сравнению с контрольными растениями и побега на 5,9 % и 18,2 % соответственно. Ионы свинца в концентрации 10^{-4} М также приводили к уменьшению длины корня на 27,8 % и массы корня на 11,0 % по сравнению с контрольными растениями и побега на 2,2 %, но при этом масса побега незначительно увеличивалась (9,3 %). Наибольшее увеличение длины корней гороха посевного наблюдалось при воздействии ЭК в концентрации 10^{-9} М, так длина корня увеличивалась на 32,8 %, побега – на 35,8 % по сравнению с контролем, соответственно увеличивались и их массы (таблица 1, рисунок 1).

Таблица 1 – Влияние 24-эпикастастерона и его конъюгатов на морфометрические параметры гороха посевного сорта Саламанка при воздействии ионов свинца (10-ые сутки)

Вариант опыта	Корень		Побег	
	длина, мм	масса, г	длина, мм	масса, г
Контроль	$66,6 \pm 2,19$	$0,12 \pm 0,006$	$58,6 \pm 2,38$	$0,17 \pm 0,008$
ЭК ⁻⁹ М	$88,4 \pm 1,98^*$	$0,23 \pm 0,005^{***}$	$79,6 \pm 1,18^{**}$	$0,22 \pm 0,005^*$
S23 ⁻¹¹ М	$76,4 \pm 2,5$	$0,21 \pm 0,013^{**}$	$69,4 \pm 3,7$	$0,17 \pm 0,013$
S31 ⁻⁹ М	$84,0 \pm 11,2^*$	$0,16 \pm 0,011^*$	$81,5 \pm 10,7^{**}$	$0,17 \pm 0,011$
Pb ²⁺ , 10^{-4} М	$48,1 \pm 1,6^*$	$0,11 \pm 0,006$	$57,4 \pm 1,95$	$0,18 \pm 0,006$
ЭК ⁻⁹ М + Pb ²⁺ , 10^{-4} М	$67,1 \pm 3,03^{**}$	$0,18 \pm 0,006^{**}$	$80,9 \pm 2,13^{**}$	$0,21 \pm 0,007^{**}$
S23 ⁻¹¹ М + Pb ²⁺ , 10^{-4} М	$58,3 \pm 2,13^*$	$0,17 \pm 0,004^{**}$	$74,7 \pm 1,25^{**}$	$0,24 \pm 0,033^{***}$
S31 ⁻⁹ М + Pb ²⁺ , 10^{-4} М	$57,3 \pm 1,67^*$	$0,16 \pm 0,003^{**}$	$72,8 \pm 1,74^{**}$	$0,24 \pm 0,052^{***}$
Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$39,9 \pm 0,94^{**}$	$0,10 \pm 0,003$	$55,2 \pm 1,83$	$0,14 \pm 0,007$
ЭК ⁻⁹ М + Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$53,5 \pm 2,48^*$	$0,11 \pm 0,007$	$57,1 \pm 2,05$	$0,17 \pm 0,007$
S23 ⁻¹¹ М + Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$38,6 \pm 0,85$	$0,13 \pm 0,005^{**}$	$54,0 \pm 1,52$	$0,16 \pm 0,006$
S31 ⁻⁹ М + Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$44,6 \pm 1,71$	$0,12 \pm 0,004^{**}$	$59,3 \pm 2,21$	$0,20 \pm 0,007$

Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.

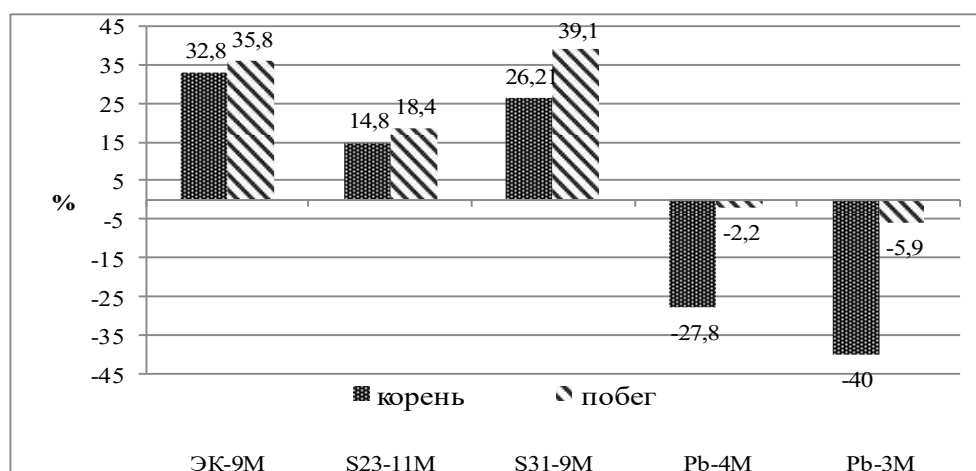


Рисунок 1 – Влияние 24-эпикастастерона и его конъюгатов, ионов свинца на морфометрические параметры гороха посевного, % относительно контроля

Предварительное замачивание семян в растворе S23 в концентрации 10^{-11} М приводило к увеличению длины корней на 14,8 %, а побегов – на 18,4 % по сравнению с контролем и значительному увеличению массы корней на 79,7 %, но при этом масса побегов увеличивалась только на 2,4 %.

При обработке S31 в концентрации 10^{-9} М длина корня увеличивалась на 26,2 %, побега – на 39,1 % по сравнению с контролем. По полученным результатам для дальнейших исследований была выбрана концентрация ионов свинца 10^{-4} М, которая оказывала менее ингибирующее воздействие на длину корней и побегов гороха посевного.

При предварительной обработке семян раствором ЭК в концентрации 10^{-9} М и дальнейшем проращивании в среде с ионами свинца концентрацией 10^{-4} М у растений гороха наблюдалось увеличение длины и массы корня на 39,5 и 66,9 % соответственно, а также длины и массы побега на 40,9 и 16,7 % по сравнению с растениями, выращенными в среде, где присутствовали ионы свинца, но не проводилось предварительное замачивание в растворе ЭК (таблица 1, рисунки 2 и 3).

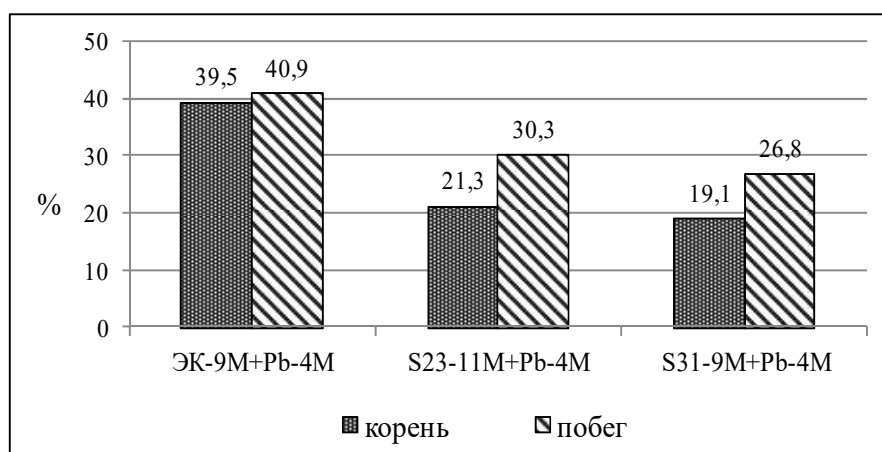


Рисунок 2 – Влияние 24-эпикастастерона и его конъюгатов на длину корня и побега гороха посевного, % относительно ионов свинца

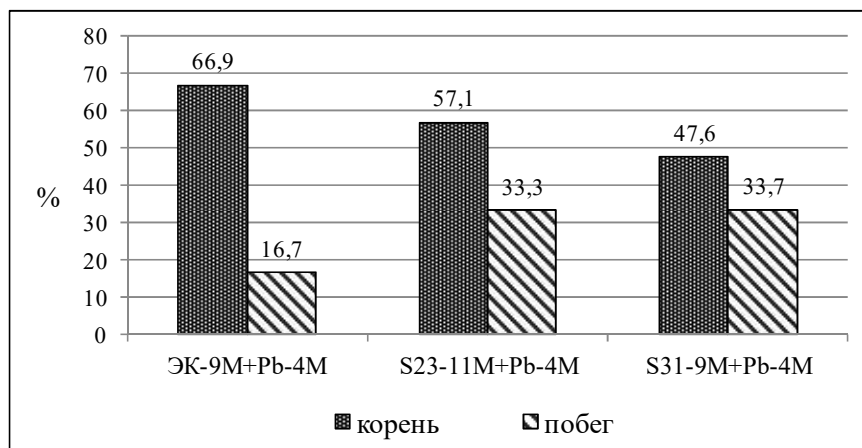


Рисунок 3 – Влияние 24-эпикастастерона и его конъюгатов на массу корня и побега гороха посевного, % относительно ионов свинца

При предварительном замачивании семян в растворе S23 с концентрацией 10^{-11} М и дальнейшем проращивании в растворе с ионами свинца концентрацией 10^{-4} М у растений гороха также наблюдалось увеличение длины корня на 21,3 % и массы корня на 57,1 % (таблица 1, рисунки 2 и 3) и побега на 30,3 и 33,3 % соответственно.

При предварительном замачивании семян в растворе S31 с концентрацией 10^{-9} М и дальнейшем проращивании в среде, содержащей ионы свинца, наблюдалось незначительное увеличение длины корня, что составляло 19,1 % и массы корня – 47,6 %, но при этом длина побега увеличивалась на 26,8 и масса на 33,7 % соответственно (таблица 1, рисунки 2 и 3).

Более высокий прирост по длине и массе корней и побегов отмечался при предварительном замачивании семян в растворе ЭК в концентрации 10^{-9} М и дальнейшем проращивании в среде с ионами свинца в концентрации 10^{-4} М (рисунки 2 и 3).

Таким образом, по результатам лабораторного опыта можно сделать вывод, что наиболее эффективными исследуемыми веществами, оказывающими наибольший достоверный эффект на рост, массу корней и побегов гороха посевного сорта Саламанка и протекторного действия при воздействии ионов свинца, является ЭК в концентрации 10^{-9} М и S23 в концентрации 10^{-11} М.

Дальнейшее изучение влияния 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами на длину корня и побега гороха посевного в результате вегетационного лабораторного опыта показало достоверно, что ионы свинца в концентрации 10^{-4} М приводят к уменьшению длины корня на 15,8 % и длины побега на 23,6 % по сравнению с контрольными растениями (таблица 2). Наибольший прирост длины корней гороха посевного наблюдается при воздействии ЭК в концентрации 10^{-9} М, так длина корня увеличивалась на 14,8 %, прирост по побегу незначителен: на 1,2 % по сравнению с контролем.

При предварительной обработке семян ЭК в концентрации 10^{-9} М и дальнейшем проращивании в почвогрунте с ионами свинца у растений гороха посевного наблюдалось увеличение длины корня на 16,3 % и длины побега на 20,2 % по сравнению с растениями, выращенными в среде, где присутствовали ионы свинца в концентрации 10^{-4} М, но не проводилось предварительное замачивание в растворе ЭК (таблица 2, рисунок 4). При предварительном замачивании семян в растворе S23 с концентрацией 10^{-11} М и дальнейшем проращивании в почвогрунте с ионами свинца у растений гороха посевного также наблюдалось увеличение длины корня на 11,2 и побега на 21,6 % соответственно. Предварительная обработка семян S31 и дальнейшее проращивание в почвогрунте с ионами свинца незначительно увеличивали длину корня и побега в среднем на 1,11 и 10,5 % соответственно (таблица 2, рисунок 4).

Таблица 2 – Влияние 24-эпикастастерона и его конъюгатов на морфометрические параметры гороха посевного сорта Саламанка при воздействии ионов свинца (20-ые сутки)

Вариант опыта	Корень		Побег	
	длина, мм	% к контролю	длина, мм	% к контролю
Контроль	$135,7 \pm 3,41$	100,0	$220,3 \pm 7,88$	100,0
Pb^{2+} , 10^{-4} М	$114,2 \pm 5,89^{**}$	84,2	$168,4 \pm 10,00^{***}$	76,4
ЭК, 10^{-9} М	$155,8 \pm 4,97^{**}$	114,8	$222,8 \pm 8,15$	101,2
S23, 10^{-11} М	$138,4 \pm 5,92$	102,0	$226,3 \pm 5,58$	102,7
S31, 10^{-9} М	$146,8 \pm 6,46$	108,2	$247,1 \pm 5,45^{**}$	112,2
	% к Pb^{2+} , 10^{-4} М		% к Pb^{2+} , 10^{-4} М	
ЭК, 10^{-9} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$132,8 \pm 45,7^{**}$	116,3	$202,3 \pm 8,72^{*}$	120,2
S23, 10^{-11} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$127,0 \pm 7,41^{*}$	111,2	$204,8 \pm 6,58^{***}$	121,6
S31, 10^{-9} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$115,5 \pm 4,01$	101,1	$186,13 \pm 7,52$	110,5

Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.

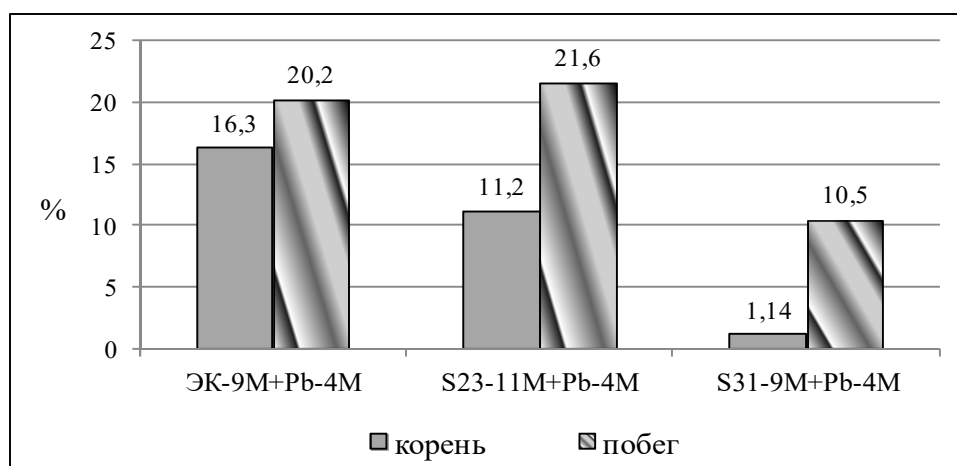


Рисунок 4 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов на длину корня и побега гороха посевного, вегетационный опыт, % относительно ионов свинца

Таким образом, ЭК в концентрации 10^{-9} М и S23 в концентрации 10^{-11} М оказывают достоверное протекторное действие на морфометрические параметры (длину подземной и надземной частей) гороха при воздействии ионов свинца.

На следующем этапе было исследовано содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a* (Хл *a*), хлорофилла *b* (Хл *b*) и каротиноидов (Кар)) в листьях гороха посевного, выращенного в защищенном грунте в вегетационном лабораторном опыте в условиях воздействия ионов свинца (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях гороха посевного сорта Саламанка в присутствии ионов свинца (вегетационный опыт)

Вариант опыта	Содержание, мг/г		
	хлорофилла <i>a</i>	хлорофилла <i>b</i>	каротиноидов
Контроль	$0,465 \pm 0,093$	$0,169 \pm 0,030$	$0,215 \pm 0,028$
Pb^{2+} , 10^{-4} М	$0,356 \pm 0,093$	$0,222 \pm 0,023$	$0,201 \pm 0,055$
ЭК, 10^{-9} М	$0,551 \pm 0,025$	$0,228 \pm 0,018$	$0,264 \pm 0,022$
S23, 10^{-11} М	$0,493 \pm 0,039$	$0,174 \pm 0,038$	$0,179 \pm 0,001$
S31, 10^{-9} М	$0,404 \pm 0,008$	$0,171 \pm 0,013$	$0,135 \pm 0,006$
ЭК, 10^{-9} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$0,450 \pm 0,018$	$0,298 \pm 0,009^*$	$0,293 \pm 0,023^*$
S23, 10^{-11} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$0,380 \pm 0,009$	$0,230 \pm 0,027$	$0,227 \pm 0,009$
S31, 10^{-9} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$0,409 \pm 0,018$	$0,248 \pm 0,03$	$0,218 \pm 0,01$

Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$.

Хлорофилл необходим для роста растений. Применение 24-эпикастерона и его конъюгатов значительно увеличивало содержание хлорофилла и улучшало фотосинтетические характеристики растений при свинцовом стрессе.

Содержание Хл *a* в листьях гороха посевного, выращенного в почвогрунте с ионами свинца, снижалось в среднем на 23,4 % по отношению к контролю, и Кар – на 6,5 % соответственно. Содержание Хл *b*, наоборот, повышалось (в среднем на 31 %).

Обработка растений раствором ЭК, 10^{-9} М, повышало содержание фотосинтетических пигментов (Хл *a*, Хл *b* и Кар) в среднем на 18,5, 6,04, 22,8 % по отношению к контролю соответственно. При обработке раствором S23, 10^{-11} М

содержание Хл *a* и Хл *b* в листьях гороха посевного повышалось незначительно, в среднем на 6 и 3 % соответственно. Обработка раствором S31, 10^{-9} М незначительно увеличивала содержание Хл *b* (на 1,1 %) и понижала содержание Кар и Хл *a* в листьях гороха. При предварительной обработке семян ЭК в концентрации 10^{-9} М и дальнейшем проращивании в почвогрунте с ионами свинца концентрацией 10^{-4} М у растений гороха посевного наблюдалось достоверное увеличение содержания Хл *a*, Хл *b* и Кар в среднем на 26,4, 34,2, 45,8 % соответственно по отношению к образцам, выращенным в среде, где присутствовали ионы свинца в концентрации 10^{-4} М, но не проводилось предварительное замачивание в растворе ЭК (таблица 3, рисунок 5).

При предварительном замачивании семян в растворе S23 с концентрацией 10^{-11} М и дальнейшем проращивании в почвогрунте с ионами свинца у растений гороха посевного также наблюдалось увеличение содержания Хл *a*, Хл *b* и Кар (в среднем на 6,7, 3,6 и 13 %). При предварительном замачивании семян в растворе S31 с концентрацией 10^{-9} М и дальнейшем проращивании в растворе с ионами свинца у растений гороха посевного также наблюдалось увеличение содержания хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов (в среднем на 14,9, 11,7 и 8,5 % соответственно) (рисунок 5).

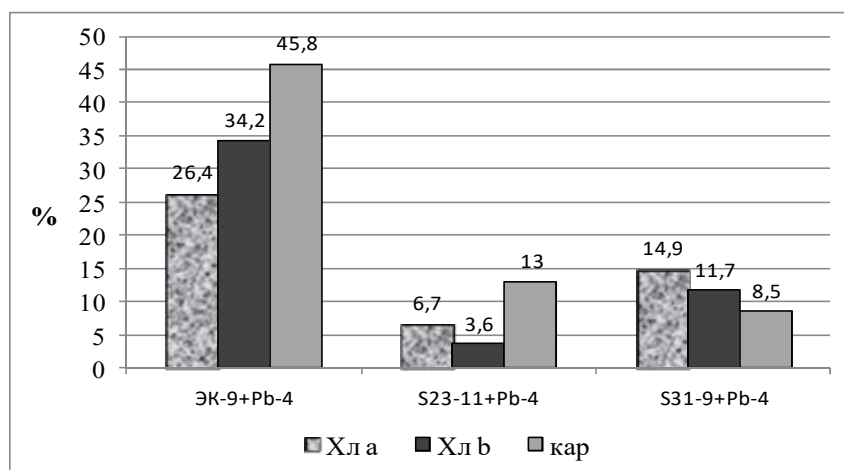


Рисунок 5 – Влияние 24-эпикастастерона и его конъюгатов на содержание фотосинтетических пигментов, % относительно ионов свинца

Хлорофилл является важным параметром, часто используемым в качестве индикатора развития хлоропластов и фотосинтетической активности. Хлорофилл очень чувствителен к внешнему стрессу, который снижает общее содержание Хл *a*, Хл *b* и каротиноидов в листьях. 24-эпикастастерон и его конъюгаты защищают хлорофилл от внешних раздражителей, а также повышают их концентрацию при стрессах.

Одним из важных показателей продуктивности гороха посевного является содержание белка. По полученным данным видна значительная тенденция к уменьшению содержания белка под воздействием ростостимулирующих препаратов (таблица 4). Однако при обработке семян ЭК и дальнейшем проращивании в почвогрунте с ионами свинца содержание белка увеличивалось в среднем на 23,23 % по отношению к образцам, выращенным в почвогрунте, где присутствовали ионы свинца в концентрации 10^{-4} М, но не проводилось предварительное замачивание в растворе ЭК (таблица 4, рисунок 6). Обработка семян S23 и S31 также приводила к незначительному повышению содержания белка в исследуемых образцах.

Таблица 4 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов на содержание белка в надземных частях проростков гороха посевного сорта Саламанка в присутствии ионов свинца (вегетационный опыт)

Вариант опыта	Содержание белка	
	мг/г сырой массы	% к контролю
Контроль	$84,39 \pm 3,7$	100,0
Pb^{2+} , 10^{-4} М	$62,38 \pm 2,3$	74,0
ЭК, 10^{-9} М	$57,47 \pm 6,0$	68,1
S23, 10^{-11} М	$49,77 \pm 1,8$	59,0
S31, 10^{-9} М	$50,93 \pm 1,6$	60,0
		% к Pb^{2+} , 10^{-4} М
ЭК, 10^{-9} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$76,87 \pm 1,8$	123,2
S23, 10^{-11} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$65,84 \pm 2,6$	105,5
S31, 10^{-9} М + Pb^{2+} , 10^{-4} М	$67,71 \pm 1,7$	108,5

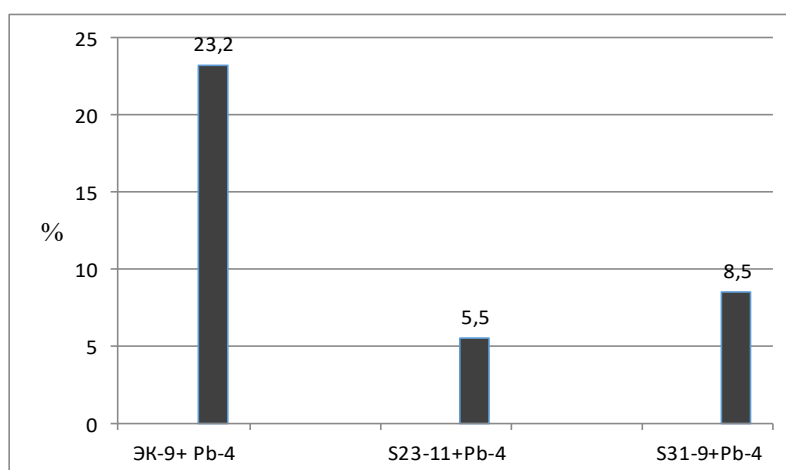


Рисунок 6. – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов на содержание белка, % относительно ионов свинца

Заключение

В лабораторных условиях проведено исследование биологической активности 24-эпикастерона (ЭК) и его конъюгатов с биологически значимыми органическими кислотами по влиянию на морфометрические и биохимические параметры гороха посевного сорта Саламанка. Выявлено, что растения гороха посевного отвечали на интенсивный стресс ионов свинца целым комплексом физиологических реакций: торможением роста в высоту, уменьшением сырой массы, снижением содержания хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов, снижением содержания белка.

Таким образом, по результатам вегетационного лабораторного опыта (в почвогрунте) можно достоверно сделать следующие выводы:

1. ЭК и его конъюгаты обладают протекторным действием в отношении ионов свинца на морфометрические параметры, содержание основных фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов) и белка у растений гороха посевного.

2. Из протестированных веществ и концентраций для гороха посевного максимальным эффектом повышения морфометрических параметров (длины, массы корня и побега), а также содержания фотосинтетических пигментов обладает ЭК в концентрации 10^{-9} М при предварительном замачивании семян в данном растворе и дальнейшем проращивании в растворе с ионами свинца.

3. Предобработка семян растений ЭК и его конъюгатами, вероятно, способствует снижению повреждающего действия ионов свинца на растения, что указывает на их участие в развитии реакций, способствующих преадаптации растений к возможным стрессовым ситуациям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химическое загрязнение почв и их охрана : словарь-справочник / Д. С. Орлов [и др.]. – М. : Агропромиздат. – 1991. – 303 с.
2. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях. / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 437 с.
3. Башмаков, Д. И. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений / Д. И. Башмаков, А. С. Лукаткин. – Саранск : Мордов. ун-т., 2009. – 236 с.
4. Kripach, V. Twenty years of brassinosteroids: steroidal plants hormones warrant better crops for the XXI century / V. Kripach, V. Zhabinskii, A. de Groot // *Annals Bot.* – 2000. – Vol. 86. – P. 441–447.
5. Синтез и стресс-протекторное действие на растения конъюгатов брассиностероидов с салициловой кислотой / Р. П. Литвиновская [и др.] // *Химия природ. соединений.* – 2016. – № 3. – С. 394–398.
6. Ефимова, М. В. Влияние брассиностероидов на формирование защитных реакций проростков рапса в условиях засоления / М. В. Ефимова, А. В. Мануйлова, М. К. Малофий // *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология.* – 2013. – № 1 (21). – С. 118–128.
7. Шор, В. Ч. Возделывание гороха и яровой вики в чистых и смешанных посевах / В. Ч. Шор, Л. И. Белявская // *Современные ресурсосберегающие технологии производства растениеводческой продукции в Беларуси : сб. науч. тр. / РУП «Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию».* – Минск : ИВЦ Минфина, 2007. – С. 179–190.
8. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Межгосударственный стандарт : ГОСТ 12038–84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартинформ, 2011. – 29 с.
9. Дышко, В. Н. Агрохимические методы исследований : учеб.-метод. пособие / В. Н. Дышко, В. В. Дышко, П. В. Романенко. – Смоленск : Смолен. ГСХА, 2014. – 48 с.
10. Шульгин, И. А. Расчет содержания пигментов с помощью номограмм / И. А. Шульгин, А. А. Ничипорович // *Хлорофилл : сб. науч. ст. ; под ред. А. А. Шлыка.* – Минск : Наука и техника, 1974. – С. 121–136.
11. Protein measurement with Folin phenol reagent / O. H. Lowry [et al.] // *J. Biol. Chem.* – 1951. – Vol. 193, nr 1. – P. 265–275.
12. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Ураджай, 1973. – 320 с.

REFERENCES

1. Khimichieskoje zagriaznienije pochv i ikh okhrana : slovar'-spravochnik / D. S. Orlov [i dr.]. – M. : Agropromizdat. – 1991. – 303 s.
2. Kabata-Piendias, A. Mikroeliemienty v pochvakh i rastienijakh. / A. Kabata-Pendias, H. Piendias. – M. : Mir, 1989. – 437 s.
3. Bashmakov, D. I. Ekologo-fiziologichieskije aspiekty akkumuliacii i raspriedielienija tiazholykh mietallov u vysshikh rastienij / D. I. Bashmakov, A. S. Lukatkin. – Saransk : Mordov. un-t., 2009. – 236 s.

4. Kripach, V. Twenty years of brassinosteroids: steroidal plants hormones warrant better crops for the XXI century / V. Kripach, V. Zhabinskii, A. de Groot // *Annals Bot.* – 2000. – Vol. 86. – P. 441–447.
5. Sintez i stress-protektornoje dejstvije na rastienija konjugatov brassinostieroidov s salicilovoj kislotoj / R. P. Litvinovskaja [i dr.] // *Khimija prirod. sojedinienij.* – 2016. – № 3. – S. 394–398.
6. Yefimova, M. V. Vlijaniye brassinostieroidov na formirovaniye zashchitnykh rieakcij prorostkov rapsa v uslovijakh zasolienija / M. V. Yefimova, A. V. Manujlova, M. K. Malofij // *Viestn. Tom. gos. un-ta. Biologija.* – 2013. – № 1 (21). – S. 118–128.
7. Shor, V. Ch. Vozdielyvaniye gorokha i jarovoj viki v chistykh i smieshannykh posievakh / V. Ch. Shor, L. I. Bieliavskaja // *Sovriemiennye riesursosbieriegajushchije tiekhnologii proizvodstva rastienijevodchieskoj produkcii v Bielarusi : sb. nauch. tr. / RUP «Nauch.-prakt. centr NAN Bielarusi po ziemliedieliju».* – Minsk : IVC Minfina, 2007. – S. 179–190.
8. Siemiena siel'skokhoziajstviennykh kul'tur. Mietody opriedielienija vskhozhesti. Miezhgosudarstviennyj standart : GOST 12038–84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.
9. Dyshko, V. N. Agrokhimichieskije mietody issliedovanij : uchieb.-mietod. posobije / V. N. Dyshko, V. V. Dyshko, P. V. Romanienko. – Smoliensk : Smolien. GSKhA, 2014. – 48 s.
10. Shul'gin, I. A. Raschiot sodierzhanija pigmientov s pomoshchju nomogramm / I. A. Shul'gin, A. A. Nichiporovich // *Khlorofill : sb. nauch. st. ; pod ried. A. A. Shlyka.* – Minsk : Nauka i tiekhnika, 1974. – S. 121–136.
11. Protein measurement with Folin phenol reagent / O. H. Lowry [et al.] // *J. Biol. Chem.* – 1951. – Vol. 193, nr 1. – P. 265–275.
12. Rokickij, P. F. Biologichieskaja statistika / P. F. Rokickij. – Minsk : Uradzhaj, 1973. – 320 s.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 04.01.2023