

УДК 577.175.1:581.143:57.085

Елена Георгиевна Артемук

канд. биол. наук, доц., зав. каф. химии

Брестского государственного университета имени А.С. Пушкина

Alena Artsiamuk

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Chemistry
of Brest State A.S. Pushkin University

e-mail: artsiamuk@mail.ru

РОСТРЕГУЛИРУЮЩЕЕ И АНТИСТРЕССОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭПИКАСТАСТЕРОНА И ЕГО КОНЬЮГАТОВ С КИСЛОТАМИ НА *TRIFOLIUM PRATENSE* L. В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ ИОНОВ СВИНЦА*

Изучена биологическая активность 24-эпикастастерона (ЭК) и его конъюгатов с кислотами на рост и биохимические параметры клевера лугового при воздействии ионов свинца. По результатам вегетационного лабораторного опыта из протестированных веществ и концентраций для клевера лугового максимальным протекторным эффектом в отношении свинца на морфометрические параметры (длину корня и побега), а также активность каталазы обладают конъюгаты 24-эпикастастерона – S23 (2-моно-салицилат 24-эпикастастерона) в концентрации 10^{-10} М и S31 (тетраиндолилacetат 24-эпикастастерона) в концентрации 10^{-8} М при использовании предпосевного замачивания семян. Предобработка семян растений S23 и S31, вероятно, позволяет снизить повреждающее действия ионов свинца на растения, что указывает на их участие в развитии реакций, способствующих преадаптации растений к возможным стрессовым ситуациям.

Ключевые слова: brassinosteroids, 24-эпикастастерон, эфиры ЭК с кислотами (конъюгаты), клевер, рострегулирующая активность, фотосинтетические пигменты, каталаза.

Growth Regulating Activity and Anti-Stress Effect of Epicasterone and its Acid Conjugates on *Trifolium Pratense* L. under the Influence of Lead Ions

The biological activity of 24-epicasterone (EC) and its conjugates with acids on the growth and biochemical parameters of red clover under the influence of lead ions was studied. According to the results of a vegetative laboratory experiment, from the tested substances and concentrations for red clover, the maximum protective effect with respect to lead on morphometric parameters (root and shoot length), as well as catalase activity, is exhibited by conjugates of 24-epicasterone – S23 (2-monosalicylate 24-epicasterone) at a concentration of 10^{-10} M and S31 (tetraindolyl acetate 24-epicasterone) at a concentration of 10^{-8} M when using presowing seed soaking. Pretreatment of seeds of S23 and S31 plants probably makes it possible to reduce the damaging effect of lead ions on plants, which indicates their participation in the development of reactions that promote plant preadaptation to possible stressful situations.

Key words: brassinosteroids, 24-epicasterone, EC acid esters (conjugates), clover, growth-regulating activity, photosynthetic pigments, catalase.

Введение

Техническое развитие общества привело к тому, что проблема загрязнения окружающей среды и выживания человечества в этих условиях стала центральной проблемой современности и коснулась всех сфер деятельности человека. В ряде случаев технологические процессы вышли из-под контроля, вследствие чего происходит стремительное на-

*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.).

копление нехарактерных для биосферы химических веществ (оксидов азота, нитратов, тяжелых металлов, техногенных радионуклидов и других токсикантов). Увеличение техногенной нагрузки на составляющие биосферу компоненты ухудшает качество природной среды и нарушает существующие в природе связи, что приводит к местным, а иногда и глобальным изменениям, имеющим зачастую необратимый характер.

В последние годы в связи с ухудшением экологического состояния многих регионов, загрязнением почвы, воды и воздуха тяжелыми металлами (ТМ) вследствие быстрой индустриализации и урбанизации возрос интерес к изучению влияния ТМ на растения.

Избыточные концентрации ТМ негативно влияют на геохимическое состояние сельскохозяйственных земель, биологическую продуктивность и качество растениеводческой и животноводческой продукции и в конечном итоге оказывают отрицательное воздействие на человека [1]. В Республике Беларусь ареалы загрязнения агроэкосистем ТМ формируются вокруг промышленных центров и отдельных предприятий, на пойменных лугах и пастбищах, в зонах влияния крупных городов, вдоль автомобильных дорог, а также на сельскохозяйственных угодьях, где длительное время в качестве удобрений бесконтрольно использовались различные отходы. Главные антропогенные источники поступления ТМ в биосферу – топливные электростанции и теплоцентрали, предприятия по добыче и переработке черных и цветных металлов, транспорт, машиностроительная и химическая отрасли промышленности, сельскохозяйственное производство, жилищно-коммунальные комплексы.

Избыточные концентрации ТМ в среде негативно влияют на рост и развитие растений, нарушая физиологические и биохимические функции, что приводит к снижению продуктивности и пищевой ценности растительного сырья [2]. Некоторые ТМ, такие как ртуть, свинец, кадмий и хром, являются высокотоксичными элементами и могут представлять серьезную опасность для всей экосистемы. Установлено, что в присутствии ТМ не только тормозятся рост и развитие растений, но и происходят многочисленные структурно-функциональные изменения в фотосинтетическом аппарате, нарушаются процессы дыхания, транспирации, транспорта веществ и т. д. В результате этого снижается продуктивность отдельных растений и целых фитоценозов, а иногда даже полностью разрушаются растительные сообщества [3; 4].

Свинец является распространенным поллютантом, характерным для почв городских территорий. 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 [5]. 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 [6]. Все это приводит к снижению урожайности и ухудшению качества сельскохозяйственной продукции. Предельно допустимая концентрация свинца для почв составляет 30 мг/кг. Его доза выше 10 мг/кг сухого вещества токсична для большинства культурных растений. Кроме того, свинец обладает синергическим действием и увеличивает токсичность других металлов [7].

В последние годы появляется большое количество публикаций, в которых обсуждается возможность снижения негативного действия ТМ на культурные растения при применении регуляторов роста, в частности брассиностероидов (БС). Проведенные исследования БС показали их влияние на регуляцию роста, повышение урожайности и биологической ценности растений, на функциональное состояние фотосинтетического ап-

парата и количество пигментов, а также вовлечение их в регуляцию формирования защитных систем растений [8–11]. В настоящее время получены данные о росторегулирующей, стресс-протекторной и антиоксидантной активности конъюгатов БС с кислотами на молодые растения проса, пшеницы и ярового ячменя [12–14]. В связи с этим представлялось интересным исследование некоторых эфиров ЭК в отношении растений клевера лугового.

Целью данного исследования является изучение влияния 24-эпикастестерона и его конъюгатов с салициловой и индолилуксусной кислотами на рост и антистрессовую устойчивость растений клевера лугового *Trifolium pratense* L. в условиях воздействия ионов свинца.

Материалы и методы

Для изучения влияния биологической активности 24-эпикастестерона и его конъюгатов с кислотами в условиях воздействия ионов свинца в качестве объекта исследования был выбран клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) сорта Слуцкий. Клевер луговой сорта Слуцкий – местный сорт, широко распространенный в хозяйствах Республики Беларусь.

24-Эпикастестерон и его конъюгаты – 2-моносалицилат 24-эпикастестерона (S23) и 2,3,22,23-тетраиндолилацетат 24-эпикастестерона (S31) – синтезированы в Лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси.

Для подбора концентрации свинца, ингибирующей рост и развитие клевера лугового, был выбран широкий диапазон концентраций $Pb(NO_3)_2$: 10^{-2} М, 10^{-3} М, 10^{-4} М, 10^{-5} М, 10^{-6} М. Семена клевера лугового проращивали по стандартной методике проращивания по ГОСТ 12038–84 [15] с добавлением раствора нитрата свинца с концентрациями от 10^{-2} до 10^{-6} М. Проращивание осуществлялось на фильтровальной бумаге в термостате при 20 °С в темноте, на 7 сутки определяли всхожесть, среднюю длину корней и побегов проростков клевера [16]. В качестве контроля использовалась вода. Все опыты проводились в четырехкратной повторности. В результате проведенных исследований была определена концентрация свинца, которая оказывала ингибирующее влияние на рост проростков изучаемой культуры, но не приводила к полной гибели растений с целью проведения дальнейших исследований влияния брассиностероидов (ЭК и его конъюгатов с кислотами) на рост и развитие клевера лугового при воздействии ионов свинца.

На втором этапе исследований проводилась оценка влияния 24-ЭК и его конъюгатов с кислотами (S23 (2-моносалицилат 24-эпикастестерона) и S31 (тетраиндолилацетат 24-эпикастестерона)) на морфометрические параметры клевера лугового при воздействии ионов свинца. Были использованы концентрации БС, которые в предварительном лабораторном опыте оказывали наибольший эффект на посевные качества семян, рост корней и побегов клевера лугового, а также $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией, которая в предварительном опыте оказывала ингибирующее влияние на рост и развитие изучаемого растения, но не приводила к полной его гибели. Проращивание семян растений осуществлялось согласно ГОСТ 12038–84 [15]. Все опыты проводились в четырехкратной повторности.

Третий этап исследований был связан с анализом влияния 24-ЭК и его конъюгатов с кислотами на морфометрические и физиолого-биохимические параметры клевера лугового, выращенного в защищенном грунте в результате вегетационного лабораторного опыта [17; 18] в условиях воздействия ионов свинца с изучением параметров длины подземной и надземной частей, а также содержания основных фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов) и активности фермента каталазы. Для проведения вегетационного опыта были использованы наиболее эффективные концентрации ЭК и его конъюгатов с кислотами: S23 (2-моносалицилат 24-эпикастестерона) и S31 (тетраиндолилацетат 24-эпикастестерона), которые в предварительном лабораторном опыте

оказывали наибольший эффект на посевные качества семян, рост корней и побегов изучаемых сельскохозяйственных культур, а также $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией, которая в предварительном опыте оказывала ингибирующее влияние на рост и развитие изучаемых растений, но не приводила к полной гибели растений.

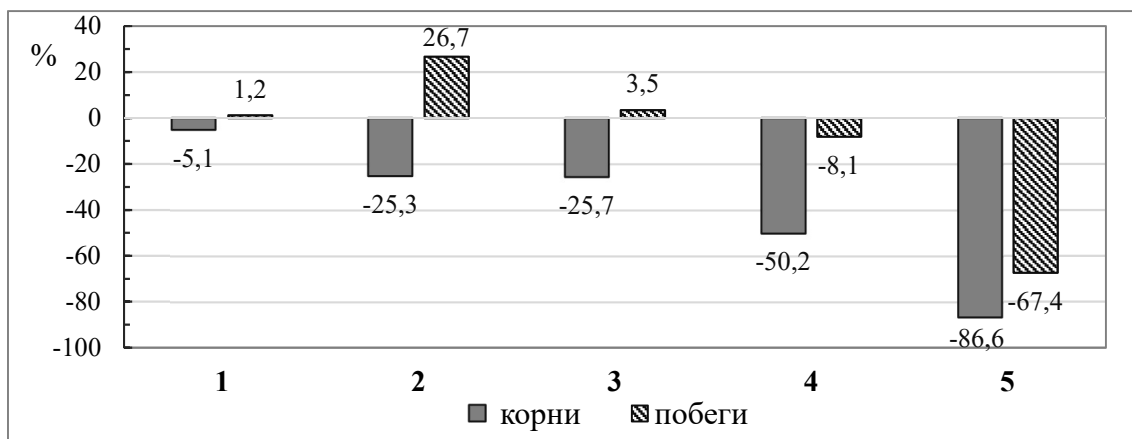
Семена замачивали в растворах 24-ЭК и его конъюгатов на 5 ч, далее высаживали в пластиковые контейнеры 9х9х10 см на универсальном почвогрунте («Хозяин», Беларусь) и выращивали в лабораторных условиях вегетационного эксперимента. Опытные образцы поливались раствором $Pb(NO_3)_2$ с соответствующей концентрацией. Контролем являлся вариант без внесения раствора $Pb(NO_3)_2$. Растения выращивали в условиях постоянной влажности почвы. Вегетационные емкости перемещали ежедневно по схеме, обеспечивающей однородные условия роста и развития растений. Все опыты проводились в четырехкратной повторности.

Для определения содержания основных фотосинтетических пигментов использовали спектрофотометрический метод [19; 20]. В качестве растворителя был выбран 100 %-ый ацетон. Определение активности каталазы в корнях и побегах клевера лугового проводили по методу М. А. Королук [21], основанному на способности перекиси водорода образовывать с солями молибдена стойкий окрашенный комплекс.

Статистическую обработку всех полученных результатов проводили по общепринятым методикам биологической статистики согласно П. Ф. Рокицкому [22] с использованием программы Microsoft Excel и t-критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что при использовании свинца в концентрациях 10^{-6} – 10^{-2} М наблюдалось ингибирование роста корней у растений клевера лугового. Длина корней уменьшалась на 5,1–86,6 % по сравнению с контролем (рисунок 1).



1 – Pb^{2+} , 10^{-6} М; 2 – Pb^{2+} , 10^{-5} М; 3 – Pb^{2+} , 10^{-4} М; 4 – Pb^{2+} , 10^{-3} М; 5 – Pb^{2+} , 10^{-2} М

Рисунок 1 – Влияние различных концентраций ионов свинца на морфометрические параметры клевера лугового сорта Слуцкий, % относительно контроля

Таким образом, для дальнейших исследований была выбрана концентрация ионов свинца 10^{-3} М, которая оказывала сильное ингибирующее действие на длину корней и побегов клевера лугового, однако не приводила к гибели растений.

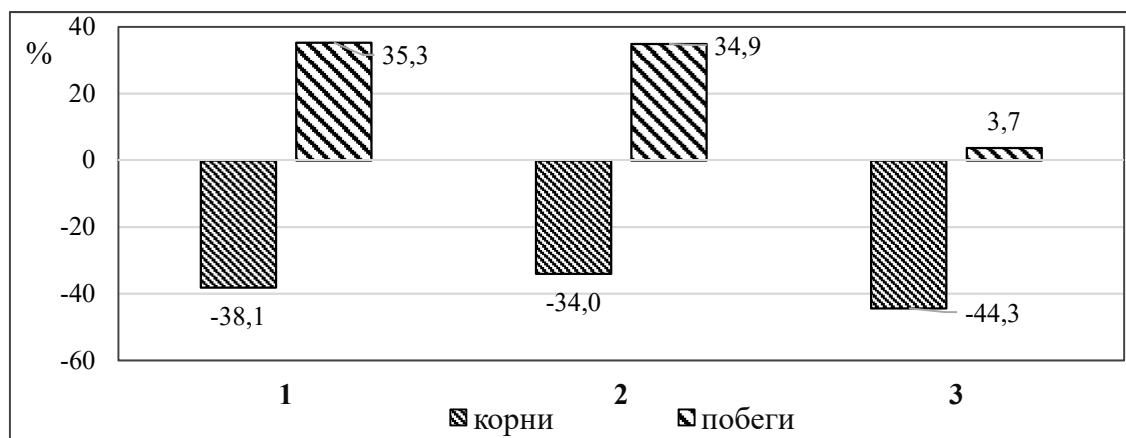
Проведенные исследования влияния ЭК и его конъюгатов с кислотами – S23 и S31 на морфометрические параметры клевера лугового сорта Слуцкий при воздействии ионов свинца показали, что ионы свинца в концентрации 10^{-3} М приводили к уменьшению длины корня на 56,3 % и побега на 1,8 % по сравнению с контролем (таблица 1). ЭК

и его конъюгаты S23 и S31 практически не оказали протекторного влияния на растения клевера лугового. Так при предварительном замачивании семян клевера лугового в растворах ЭК, S23 и S31 определенных концентраций и дальнейшем проращивании в растворе, содержащем ионы свинца с концентрацией 10^{-3} М, наблюдается уменьшение длины корней по сравнению с растениями, которые проращивались в среде с ионами свинца, но без замачивания в растворах БС. Протекторное действие на длину побегов оказывали ЭК и S23 в концентрации 10^{-10} М. Так, длина побегов увеличивалась на 35,3 и 34,9 % по сравнению с растениями без предварительного замачивания в растворах данных БС (рисунок 2).

Таблица 1 – Влияние эпикастастерона и его конъюгатов на морфометрические параметры клевера лугового сорта Слуцкий при воздействии ионов свинца

Вариант опыта	Корень		Побег	
	длина, мм	% к контролю	длина, мм	% к контролю
Контроль	$22,2 \pm 0,48$	100,0	$27,4 \pm 0,46$	100,0
ЭК, 10^{-10} М	$31,6 \pm 0,69^{***}$	142,3	$27,9 \pm 0,46$	101,8
S23, 10^{-10} М	$30,4 \pm 0,58^{***}$	136,9	$27,8 \pm 0,42$	101,5
S31, 10^{-8} М	$32,8 \pm 0,64^{***}$	147,7	$27,6 \pm 0,39$	100,7
Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$9,7 \pm 0,30^{***}$	43,7	$26,9 \pm 0,43$	98,2
		% к Pb ²⁺ , 10^{-3} М		% к Pb ²⁺ , 10^{-3} М
ЭК, 10^{-10} М + Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$6,0 \pm 0,23^{***}$	61,9	$36,4 \pm 0,43^{***}$	135,3
S23, 10^{-10} М + Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$6,4 \pm 0,24^{***}$	66,0	$36,3 \pm 0,51^{***}$	134,9
S31, 10^{-8} М + Pb ²⁺ , 10^{-3} М	$5,4 \pm 0,21^{***}$	55,7	$27,9 \pm 0,92$	103,7

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



1 – ЭК, 10^{-10} М + Pb²⁺, 10^{-3} М; 2 – S23, 10^{-10} М + Pb²⁺, 10^{-3} М;
3 – S31, 10^{-8} М + Pb²⁺, 10^{-3} М

Рисунок 2 – Влияние эпикастастерона и его конъюгатов на морфометрические параметры клевера лугового сорта Слуцкий, % относительно ионов свинца

Таким образом, по результатам лабораторного эксперимента можно сделать вывод, что ЭК и его конъюгаты (S23 (2-моносалицилат 24-эпикастастерона) и S31 (тетраиндолилацетат 24-эпикастастерона)) практически не оказывают протекторного эффекта при воздействии ионов свинца на растения клевера лугового. Снижение негативного действия свинца наблюдается только на длину побегов клевера при предварительной обработке семян ЭК и S23 в концентрации 10^{-10} М (рисунок 2).

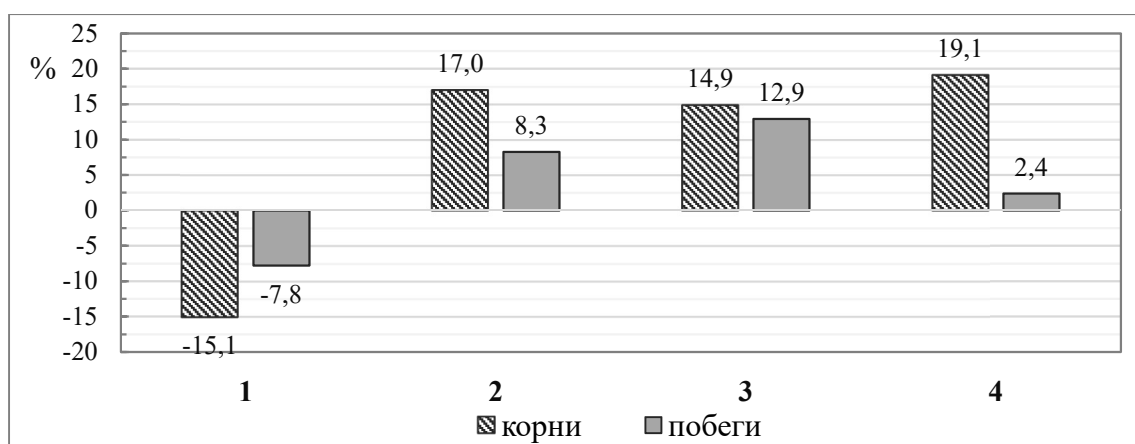
Вегетационный лабораторный эксперимент. На этом этапе исследований был проведен анализ влияния 24-эпикастерона и его конъюгатов с кислотами на морфометрические и биохимические параметры клевера лугового сорта Слуцкий, выращенного в защищенном грунте в результате вегетационного лабораторного опыта в условиях воздействия ионов свинца с изучением параметров длины подземной и надземной частей клевера, а также содержания основных фотосинтетических пигментов и активности фермента каталазы.

Проведенные исследования показали, что при использовании свинца в концентрации 10^{-3} М наблюдалось ингибирование роста корней и побегов у растений клевера лугового. Длина корней уменьшалась на 15,1 %, а побегов – на 7,8 % по сравнению с контрольными образцами (таблица 2, рисунок 3). Предварительная обработка семян клевера ЭК в концентрации 10^{-10} М и его конъюгатами S23 в концентрации 10^{-10} М и S31 в концентрации 10^{-8} М приводила к увеличению длины корней и побегов у растений клевера лугового. Так, длина корней увеличивалась на 14,9–19,1 %, а побегов – на 2,4–12,9 % (рисунок 3). Таким образом, ЭК и его конъюгаты в изученных концентрациях оказывали протекторное действие на морфометрические параметры (длину подземной и надземной частей) клевера при воздействии ионов свинца.

Таблица 2. – Влияние эпикастерона и его конъюгатов на морфометрические параметры клевера лугового сорта Слуцкий при воздействии ионов свинца (вегетационный опыт)

Вариант опыта	Корень		Побег	
	длина, мм	% к контролю	длина, мм	% к контролю
Контроль	$33,9 \pm 1,10$	100,0	$61,5 \pm 0,74$	100,0
$Pb^{2+}, 10^{-3}$ М	$28,8 \pm 0,59^{***}$	84,9	$56,7 \pm 0,74^{***}$	92,2
		% к $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М		% к $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М
ЭК, 10^{-10} М + $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М	$33,6 \pm 0,95^{***}$	117,0	$61,4 \pm 0,92^{***}$	108,3
S23, 10^{-10} М + $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М	$33,0 \pm 0,99^{***}$	114,9	$64,1 \pm 0,92^{***}$	112,9
S31, 10^{-8} М + $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М	$34,3 \pm 0,92^{***}$	119,1	$58,1 \pm 0,77$	102,4

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



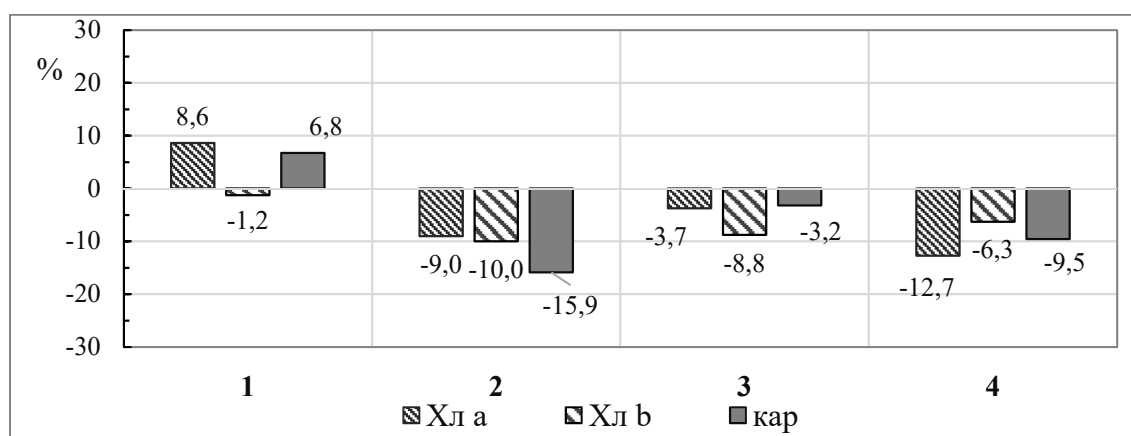
1 – $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М; 2 – ЭК, 10^{-10} М + $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М; 3 – S23, 10^{-10} М + $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М;
4 – S31, 10^{-8} М + $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М

Рисунок 3 – Влияние 24-эпикастерона и его конъюгатов на морфометрические параметры клевера лугового сорта Слуцкий при воздействии ионов свинца (вариант с $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М в % относительно контроля, опытные варианты в % относительно $Pb^{2+}, 10^{-3}$ М)

Исследование содержания основных фотосинтетических пигментов в листьях клевера лугового проводилось с изучением содержания хлорофилла *a* (Хл *a*), хлорофилла *b* (Хл *b*) и каротиноидов (Кар). Проведенные исследования показали, что при использовании свинца в концентрации 10^{-3} М наблюдалось повышение содержания хлорофилла *a* и каротиноидов на 8,6 и 6,8 % соответственно, однако эти различия статистически недостоверны (таблица 3, рисунок 4). При предпосевной обработке семян клевера лугового брассиностероидами зафиксировано снижение содержания всех изученных пигментов относительно варианта с Pb^{2+} , 10^{-3} М.

Таблица 3 – Влияние эпикастастерона и его конъюгатов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях клевера лугового сорта Слуцкий при воздействии ионов свинца (вегетационный лабораторный опыт)

Вариант опыта	Содержание, мг/г		
	хлорофилла <i>a</i>	хлорофилла <i>b</i>	каротиноидов
Контроль	$1,74 \pm 0,06$	$0,81 \pm 0,06$	$0,59 \pm 0,04$
Pb^{2+} , 10^{-3} М	$1,89 \pm 0,09$	$0,80 \pm 0,03$	$0,63 \pm 0,03$
ЭК, 10^{-10} М + Pb^{2+} , 10^{-3} М	$1,72 \pm 0,13$	$0,72 \pm 0,05$	$0,53 \pm 0,04$
S23, 10^{-10} М + Pb^{2+} , 10^{-3} М	$1,82 \pm 0,06$	$0,73 \pm 0,02$	$0,61 \pm 0,01$
S31, 10^{-8} М + Pb^{2+} , 10^{-3} М	$1,65 \pm 0,11$	$0,75 \pm 0,04$	$0,57 \pm 0,02$



1 – Pb^{2+} , 10^{-3} М; 2 – ЭК, 10^{-10} М + Pb^{2+} , 10^{-3} М; 3 – S23, 10^{-10} М + Pb^{2+} , 10^{-3} М;
4 – S31, 10^{-8} М + Pb^{2+} , 10^{-3} М

Рисунок 4 – Влияние эпикастастерона и его конъюгатов на содержание фотосинтетических пигментов клевера лугового сорта Слуцкий при воздействии ионов свинца (вариант с Pb^{2+} , 10^{-3} М в % относительно контроля, опытные варианты в % относительно Pb^{2+} , 10^{-3} М)

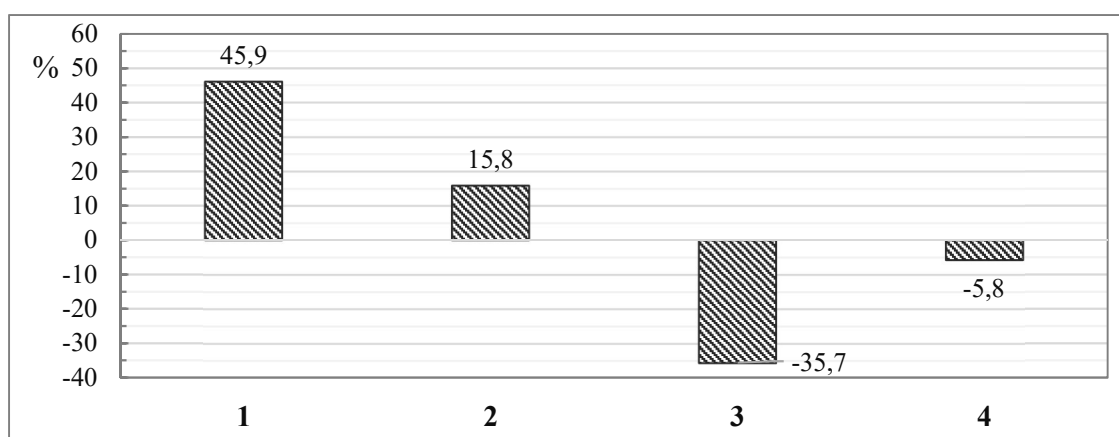
Основные функции в регуляторной деятельности клетки выполняют ферменты антиоксидантной защиты (пероксидаза и каталаза), обеспечивающие нормальный ход окислительных процессов при различного рода неблагоприятных воздействиях. Одно из проявлений защитных реакций растений в условиях стресс-факторов – это возрастание активности пероксидазы и каталазы [23].

В опытах с клевером луговым ионы свинца в концентрации 10^{-3} М приводили к увеличению активности каталазы в листьях. Так, активность каталазы увеличивалась на 45,9 % (таблица 4, рисунок 5). Предварительная обработка семян конъюгатами S23 в концентрации 10^{-10} М и S31 в концентрации 10^{-8} М приводила к снижению активности каталазы в корнях на 35,7 и 5,8 % соответственно.

Таблица 4 – Влияние эпикастастерона и его конъюгатов на активность каталазы в листьях клевера лугового сорта Слудский при воздействии ионов свинца (вегетационный лабораторный опыт)

Вариант опыта	Активность каталазы	
	мкат/л	% к контролю
Контроль	291,66 ± 7,39	100,0
Pb ²⁺ , 10 ⁻³ М	425,62 ± 7,08**	145,9
		% к Pb ²⁺ , 10 ⁻³ М
ЭК, 10 ⁻¹⁰ М + Pb ²⁺ , 10 ⁻³ М	492,66 ± 14,26*	115,8
S23, 10 ⁻¹⁰ М + Pb ²⁺ , 10 ⁻³ М	273,77 ± 4,80**	64,3
S31, 10 ⁻⁸ М + Pb ²⁺ , 10 ⁻³ М	400,75 ± 18,03	94,2

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



1 – Pb²⁺, 10⁻³ М; 2 – ЭК, 10⁻¹⁰ М + Pb²⁺, 10⁻³ М; 3 – S23, 10⁻¹⁰ М + Pb²⁺, 10⁻³ М;
4 – S31, 10⁻⁸ М + Pb²⁺, 10⁻³ М

Рисунок 5 – Влияние 24-эпикастастерона и его конъюгатов на активность каталазы в листьях клевера лугового сорта Слудский при воздействии ионов свинца (вариант с Pb²⁺, 10⁻³ М в % относительно контроля, опытные варианты в % относительно Pb²⁺, 10⁻³ М)

Заклучение

В лабораторных условиях на начальном этапе развития растений 24-эпикастастерон и его конъюгаты (S23 (2-моносалицилат 24-эпикастастерона) и S31 (тетраиндолилацетат 24-эпикастастерона)) практически не оказывают протекторного эффекта при воздействии ионов свинца на растения клевера лугового. Снижение негативного действия свинца наблюдается только на длину побегов клевера при предварительной обработке семян ЭК и S23 в концентрации 10⁻¹⁰ М.

По результатам вегетационного лабораторного опыта из протестированных веществ и концентраций для клевера лугового максимальным протекторным эффектом в отношении свинца на морфометрические параметры (длину корня и побега), а также активность каталазы обладают конъюгаты эпикастастерона S23 в концентрации 10⁻¹⁰ М и S31 в концентрации 10⁻⁸ М при использовании предпосевного замачивания семян. Предобработка семян растений S23 и S31, вероятно, позволяет снизить повреждающее действия ионов свинца на растения, что указывает на их участие в развитии реакций, способствующих преадаптации растений к возможным стрессовым ситуациям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, 2002. – 239 с.
2. Kisa, D. The responses of antioxidant system against the heavy metal-induced stress in tomato / D. Kisa // J. of Natural and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 22, Nr 1. – P. 1–6.
3. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск : Карел. науч. центр РАН, 2014. – 194 с.
4. Ильин, В. Б. Влияние тяжелых металлов на рост, развитие и урожайность сельскохозяйственных культур / В. Б. Ильин, Г. А. Гармаш, Н. Ю. Гармаш // Агрохимия. – 1985. – № 6. – С. 90–100.
5. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 437 с.
6. 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.
7. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю. В. Алексеев. – Л. : Агропромиздат, 1987. – 142 с.
8. Khripach, V. Brassinosteroids: a new role of steroids as bio-signaling molecules / V. Khripach, V. Zhabinskii, R. Karnachuk // Chemical probes in biology : Science at the Interface of Chemistry, Biology and Medicine ; ed. M. P. Schneider. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2003. – P. 153–167.
9. Hayat, S. Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones / S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht : Springer, 2011. – 462 p.
10. Ефимова, М. В. Регуляция эпибрасинолидом морфогенеза и содержания фотосинтетических пигментов в проростках *Arabidopsis thaliana* / М. В. Ефимова, М. А. Елисеева // Тр. Том. гос. ун-та. Сер. биол. – 2010. – № 275. – С. 267–271.
11. Влияние лактон- и кетонсодержащих брассиностероидов на фотосинтетическую активность листьев ячменя при старении / И. С. Ковтун [и др.] // Физиология растений. – 2021. – Т. 68, № 3. – С. 268–278.
12. 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.
13. Индолил-3-ацетоксипроизводные брассиностероидов: синтез и рострегулирующая активность / Р. П. Литвиновская [и др.] // Химия природ. соединений. – 2013. – № 3. – С. 408–414.
14. Защитное действие салицилатов брассиностероидов на растения ярового ячменя, подвергнутых биотическому стрессу / Н. Е. Манжелесова [и др.] // Докл. НАН Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 304–311.
15. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038–84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартинформ, 2011. – 29 с.
16. Методика определения силы роста семян кормовых культур / В. И. Карпин [и др.]. – М. : Изд-во РГАУ–МСХА, 2012. – 16 с.
17. Журбицкий, З. И. Теория и практика вегетационного метода / З. И. Журбицкий. – М. : Наука, 1968. – 260 с.
18. Дышко, В. Н. Агрохимические методы исследований : учеб.-метод. пособие / В. Н. Дышко, В. В. Дышко, П. В. Романенко. – Смоленск : ФГБОУ ВПО Смолен. ГСХА, 2014. – 48 с.

19. Гавриленко, В. Ф. Большой практикум по фотосинтезу / В. Ф. Гавриленко, Т. В. Жигалова ; под ред. И. П. Ермакова. – М. : Академия, 2003. – 256 с.
20. 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.
21. Метод определения активности каталазы / М. А. Королюк [и др.] // Лаб. дело. – 1988. – № 1. – С. 16–19.
22. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Ураджай, 1973. – 320 с.
23. Перекисное окисление и стресс / В. А. Барабой [и др.]. – СПб. : Наука, 1992. – 148 с.

REFERENCES

1. Golovatyj, S. Ye. Tiazholyje mietally v agroekosistiemakh / S. Ye. Golovatyj. – Minsk : In-t pochvoviedienija i agrokhimii NAN Bielarusi, 2002. – 239 s.
2. Kisa, D. The responses of antioxidant system against the heavy metal-induced stress in tomato / D. Kisa // J. of Natural and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 22, Nr 1. – P. 1–6.
3. Titov, A. F. Tiazholyje mietally i rastienija / A. F. Titov, N. M. Kaznina, V. V. Talanova. – Pietrozavodsk : Kariel. nauch. centr RAN, 2014. – 194 s.
4. Il'in, V. B. Vlijanije tiazholykh mietallov na rost, razvitije i urozhajnost' sel'sko-khozajstviennykh kul'tur / V. B. Il'in, G. A. Garmash, N. Yu. Garmash // Agrokhimija. – 1985. – № 6. – S. 90–100.
5. Kabata-Piendias, A. Mikroeliemienty v pochvakh i rastienijakh / A. Kabata-Piendias, H. Piendias. – M. : Mir, 1989. – 437 s.
6. Bashmakov, D. I. Ekologo-fiziologichieskije aspekty akumuliacii i raspriedielienija tiazholykh mietallov u vysshikh rastienij / D. I. Bashmakov, A. S. Lukatkin. – Saransk : Mordov. un-t., 2009. – 236 s.
7. Aliksiejev, Yu. V. Tiazholyje mietally v pochvakh i rastienijakh / Yu. V. Alekseev. – L. : Agropromizdat, 1987. – 142 s.
8. Khripach, V. Brassinosteroids: a new role of steroids as bio-signaling molecules / V. Khripach, V. Zhabinskii, R. Karnachuk // Chemical probes in biology : Science at the Interface of Chemistry, Biology and Medicine ; ed. M. P. Schneider. – Dordrecht : Springer Netherlands, 2003. – P. 153–167.
9. Hayat, S. Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones / S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht : Springer, 2011. – 462 p.
10. Yefimova, M. V. Rieguliacija epibrassinolidom morfogeneza i sodierzhanija fotosintetichieskikh pigmientov v prorostkakh Arabidopsis thaliana (L.). / M. V. Yefimova, M. A. Yelisiejeva // Tr. Tom. gos. un-ta. Sier. biol. – 2010. – № 275. – P. 267–271.
11. Vlijanije lakton- i kietonsodierzhashchikh brassinostieroidov na fotosintetichieskuju aktivnost' list'jev jachmienja pri starienii / I. S. Kovtun [i dr.] // Fiziologija rastienij. – 2021. – T. 68, № 3. – S. 268–278.
12. 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.
13. Indolil-3-acetoksiproizvodnyje brassinostieroidov: sintez i rostriegulirujushchaja aktivnost' / R. P. Litvinovskaja [i dr.] // Khimija prirod. sojedinienij. – 2013. – № 3. – S. 408–414.
14. Zashchitnoje dejstvije salicilatov brassinostieroidov na rastienija jarovogo jachmienja, podviergnutykh biotichieskomu stressu / N. Ye. Manzheliesova [i dr.] // Dokl. NAN Bielarusi. – 2019. – T. 63, № 3. – S. 304–311.

-
15. Siemiena siel'skokhoziajstviennykh kul'tur. Metody opriedielienija vskhozhesti GOST12038.84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.
 16. Metodika opriedielienija sily rosta siemian kormovykh kul'tur / V. I. Karpin [i dr.]. – M. Izd-vo RGAU–MSKhA, 2012. – 16 s.
 17. Zhurbickij, Z. I. Tieorija i praktika viegietacionnogo metoda / Z. I. Zhurbickij. – M. : Nauka, 1968. – 260 s.
 18. Dyshko, V. N Agrokhimichieskije metody issliedovanij : uchieb.-metod. posobie / V. N. Dyshko, V. V. Dyshko, P. V Romanienko. – Smolensk : FGBOU VO Smolien. GSKhA, 2014. – 197 s.
 19. Gavrilienko, V. F. Bol'shoj praktikum po fotosintezu / V. F. Gavrilienko, T. V. Zhigalova ; pod ried. I. P. Yermakova. – M. : Akadiemija, 2003. – 256 s.
 20. 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.
 21. Metod opriedielienija aktivnosti katalazy / M. A. Koroliuk [i dr.] // Lab. dielo. – 1988. – № 1. – S. 16–19.
 22. Rokickij, P. F. Biologichieskaja statistika / P. F. Rokickij. – Minsk : Uradzhaj, 1973. – 320 s.
 23. Pieriekisnoje okislienije i stress / V. A. Baraboj [i dr.]. – SPb. : Nauka, 1992. – 148 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 03.01.2023