

УДК 581.821

Сергей Эдвардович Кароза¹, Анастасия Валентиновна Швайко²¹канд. биол. наук, доц., доц. каф. биологических и химических технологий
Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина²студент 4-го курса факультета естествознания

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

Sergey Karoza¹, Anastasia Shvaiko²¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Biological and Chemical Technologies
of Brest State A. S. Pushkin University²студент 4-го курса факультета естествознания²4-th Year Student of the Faculty of Natural Sciences
of Brest State A. S. Pushkin Universitye-mail: ¹karoza01@yandex.by; ²verytsarenat@gmail.com**ВЛИЯНИЕ ТЕТРАСУКЦИНАТА 24-ЭПИКАСТАСТЕРОНА
НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И СОДЕРЖАНИЕ
ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ У ГРЕЧИХИ ПОСЕВНОЙ
(*FAGOPYRUM ESCULENTUM* MOENCH.)***

Изучено влияние тетраСУКЦИНАТА 24-эпикастастерона в сравнении с 24-эпикастастероном на начальные этапы роста гречихи посевной сорта Влада и содержание фотосинтетических пигментов в ее листьях в лабораторном эксперименте. Установлено, что на основные морфометрические показатели тетраСУКЦИНАТА в концентрациях 10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} М оказал значимое положительное влияние, более выраженное при ее выращивании рулонным методом, чем в вегетационном эксперименте с использованием почвогрунта. Влияние на содержание хлорофилла и каротиноидов было сходно с действием эпикастастерона в концентрации 10^{-8} М, но проявлялось в более низких дозах.

Ключевые слова: гречиха, 24-эпикастастерон, тетраСУКЦИНАТ 24-эпикастастерона, рострегулирующая активность, энергия прорастания, всхожесть, хлорофилл, каротиноиды.

The Effect of Tetrasuccinate 24-Epicasterone on Morphometric Parameters and the Content of Photosynthetic Pigments in Buckwheat (*Fagopyrum Esculentum* Moench.)

The effect of tetrasuccinate 24-epicasterone in comparison with 24-epicasterone on the initial stages of growth of buckwheat of the Vlada variety and the content of photosynthetic pigments in its leaves in a laboratory experiment was studied. It was found that tetrasuccinate at concentrations of 10^{-10} , 10^{-9} and 10^{-8} M had a significant positive effect on the main morphometric parameters, more pronounced when it was grown by the roll method than in the vegetation experiment using soil. The effect on the content of chlorophyll and carotenoids was similar to the effect of epicasterone at a concentration of 10^{-8} M, but manifested in lower doses.

Key words: buckwheat, 24-epicasterone, tetrasuccinate 24-epicasterone, growth-regulating activity, germination energy, germination tin, chlorophyll, carotenoids.

Введение

Сельскохозяйственное производство является очень проблемной отраслью народного хозяйства из-за многих трудно предсказуемых факторов: грибковых, бактериальных и вирусных заболеваний, массового размножения вредителей и т. д. Свой вклад в эту непредсказуемость вносит и изменчивость погодных условий. Поэтому результаты вегетационного периода не всегда стабильны, и точный прогноз урожайно-

*Работа выполнена в рамках НИР «Оценка влияния природных брассиностероидов 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. (№ государственной регистрации 20211450 от 20.05.2021 г.).

сти определенной сельскохозяйственной культуры дать достаточно сложно. Повышение урожайности традиционно достигается за счет экстенсивных методов: увеличения количества применяемых удобрений, гербицидов и разнообразных пестицидов.

Но эти возможности сейчас в значительной мере исчерпаны в основном из-за отрицательных экологических последствий. Поэтому одним из перспективных путей стабилизации роста и развития сельскохозяйственных культур может быть использование биологически активных веществ, к которым относятся как естественные гормоны растений, так и их синтетические аналоги. Их преимуществом перед традиционными химическими препаратами является высокая биологическая активность в очень низких дозах, к тому же они не могут оказать отрицательного влияния на биосферу. К таким веществам относятся и брассиностероиды (БС), которые сравнительно недавно были включены в группу растительных гормонов [1; 2].

В многочисленных исследованиях установлено, что они обладают полифункциональным влиянием на растения, способны стимулировать процессы их развития и роста, для многих выявлена протекторная активность по отношению к различным стресс-факторам и их комплексам, прежде всего за счет активизации защитных механизмов растений, а не действия непосредственно на патогены [3; 4].

Влияние БС на крупяные, зернобобовые, зерновые, овощные и зеленные культуры с анализом их рострегуляторной, металло- и криопротекторной активности изучалось и в Брестском государственном университете имени А. С. Пушкина в рамках выполнения темы ГПНИ «Оценка морфофизиологической и генетической активности брассиностероидов и стероидных гликозидов для расширения спектра действия биорегуляторов растений стероидной природы» в 1996–2000 гг. [5].

Потенциальными перспективными препаратами из группы брассиностероидов могут являться их конъюгаты с органическими кислотами, одни из которых сами являются гормонами растений, например индолилуксусная кислота, другие, как салициловая и янтарная кислоты, обладают определенной биологической активностью в отношении растений.

Кроме того, конъюгация с этими кислотами изменяет физико-химические свойства препаратов (растворимость, проницаемость через мембраны), может способствовать повышению биологической, в т. ч. и протекторной, активности конъюгатов по сравнению с самими БС. Но исследований в этой области пока очень мало, так как эти вещества синтезированы в Лаборатории химии стероидов Института биорганической химии Национальной академии наук Беларуси сравнительно недавно и изучение их биологических свойств только начато. Первые данные о росторегулирующей, антиоксидантной и стресспротекторной активности этих соединений с использованием в качестве тест-объектов пшеницы и ярового ячменя были получены минскими исследователями [6; 7].

В настоящее время анализ биологической активности конъюгатов 24-эпикастастерона с кислотами как в обычных условиях, так и при токсическом воздействии ионов тяжелых металлов активно проводится в БрГУ имени А. С. Пушкина.

Результаты этих исследований показали, что как в лабораторном эксперименте, так и в вегетационном опыте под влиянием определенных концентраций 24-эпикастастерона и его конъюгатов с салициловой и индолилуксусной кислотами происходило увеличение морфометрических характеристик и количества фотосинтетических пигментов, но на тимофеевке луговой наибольшей эффективностью и универсальностью действия обладал 24-эпикастастерон [8].

На клевере луговом максимальная эффективность наблюдалась при внекорневой обработке растений растворами эпикастастерона и его тетраиндолилацетата [9]. Исследование металлопротекторных свойств этих стероидных соединений на различных

культурах выявило способность 24-эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами частично нивелировать отрицательное влияние на растения ионов свинца, но для разных видов растений и по различным показателям максимальной активностью обладали различные препараты [10–13]. Например, на горохе посевном наиболее эффективным было металлопротекторное действие самого БС, а не его конъюгатов.

Таким образом, уже установлена определенная биологическая активность 24-эпикастастерона и некоторых его конъюгатов на нескольких сельскохозяйственных культурах, но актуальным остается расширение списка как исследованных культур, так и конъюгатов данного brassinosterоида.

Одной из важных для сельского хозяйства Республики Беларусь является гречиха посевная из-за ее ценности как источника крупы, меда и лекарственных препаратов (рутин). Эта культура очень чувствительна к различным стрессовым воздействиям, в т. ч. к холоду и недостатку влаги, поэтому применение биопротекторов стероидной природы может повысить ее устойчивость к неблагоприятным факторам без причинения ущерба окружающей среде. С использованием ее в качестве тест-объекта уже было произведено исследование биологической активности конъюгатов 24-эпикастастерона с индолилуксусной и салициловой кислотами [14; 15]. Перспективным конъюгатом 24-эпикастастерона является его тетра-сукцинат, т. к. янтарная кислота широко применяется в растениеводстве как стимулятор роста и развития растений, но влияние ее соединения с brassinosterоидами ранее не исследовалось. Поэтому целью данной работы являлась оценка рострегулирующей активности тетра-сукцината 24-эпикастастерона и его влияние на содержание фотосинтетических пигментов у гречихи посевной.

Материалы и методы

Объектами исследований служили 24-эпикастастерон (ЭК) и его конъюгат с янтарной кислотой – тетра-сукцинат 24-эпикастастерона (S439), синтезированные в лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси. Тест-объектом исследования являлась гречиха посевная (*Fagopyrum esculentum* Moench.) сорта Влада. Всего в государственный реестр Беларуси, по данным на 2022 г., включено 15 сортов гречихи посевной, из них 10 – диплоидные. Для Брестской области районированы 14 сортов [16].

Диплоидный сорт Влада (регистрационный № 2005128) включен в реестр сортов в 2008 г., заявитель – РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию», районирован для всех шести областей Республики Беларусь. Он является детерминантным среднеспелым сортом прямостоячего типа. Вегетационный период – в среднем 83 дня. Средняя урожайность зерна по сортоучасткам республики за 2005–2007 гг. испытания составила 16,5 ц/га, прибавка к стандарту – 0,5 ц/га. Максимальная урожайность зерна – 28,1 ц/га получена на Климовичском ГСУ в 2007 г. Технологические и крупяные качества хорошие: выравненность зерна – 90,4 %, выход крупы – 75,6 %, крупного ядра – 61,8 %, вкус каши – 5,0 баллов, пленчатость – 23,5 %. Масса 1 000 семян в среднем – 29,5 г. Сорт отличается выровненным стеблестоем, хорошим ветвлением, дружным цветением и плодообразованием, устойчив к полеганию и среднеустойчив к осыпанию семян [17; 18].

Предметом исследования стало влияние S439 в сравнении с ЭК на начальные этапы роста и развития гречихи и содержание фотосинтетических пигментов в ее листьях. Соединения были синтезированы и предоставлены сотрудниками лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси.

Первый этап лабораторного эксперимента по оценке влияния ЭК и S439 на основные показатели, характеризующие начальные этапы роста и развития, проводился

по стандартной методике проращивания в рулонах фильтровальной бумаги по ГОСТ 12038–84 [19]. Первоначально для выявления наиболее эффективных доз препарата проводилось замачивание семян гречихи на 5 ч в растворах только тетрасукцината в спектре концентраций от 10^{-11} до 10^{-7} М, так как для самого ЭК этот этап был осуществлен при выполнении предыдущих исследований. Затем производили проращивание в рулонах и определяли энергию прорастания, всхожесть, высоту проростков, длину корней, а также массу этих органов.

На втором этапе, после определения трех наиболее эффективных концентраций проводили сравнительный эксперимент с использованием растворов как самого ЭК, так и S439 в концентрациях 10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} М, но в почвогрунте. Определяли те же параметры, но без учета энергии прорастания и всхожести. После замачивания семян на 5 ч в исследуемых растворах и их проклевывания производили посев в вегетационные сосуды в почвогрунт. Гречиху выращивали до начала цветения.

По завершении эксперимента проводили определение высоты побегов, длины корней и массы растений, а также содержания в листьях фотосинтетических пигментов. Для их экстракции использовали высечки диаметром 1 см из средней части листьев. Для уменьшения разброса данных и увеличения достоверности результатов для одной пробы делали 10 высечек, объединяли их и устанавливали массу навески.

Экстракцию пигментов производили 10 мл 100 %-ного ацетона. Пробы настаивали в холодильнике при $+4$ °С в течение 2 суток. Оптическую плотность экстракта определяли на спектрофотометре SOLAR CM2203 при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения определяемых пигментов в ацетоне: $\lambda = 662, 644$ и $440,5$ нм в трехкратной повторности, затем данные усредняли.

Содержание пигментов рассчитывали по формулам Веттштейна. После этого вычисляли сначала концентрацию пигментов в экстракте в мг/л, а затем их содержание на грамм сырой массы [20; 21].

Статистическая обработка результатов осуществлялась с помощью шаблонов таблиц Excel с определением степени достоверности по критерию Стьюдента [22].

Результаты исследования и их обсуждение

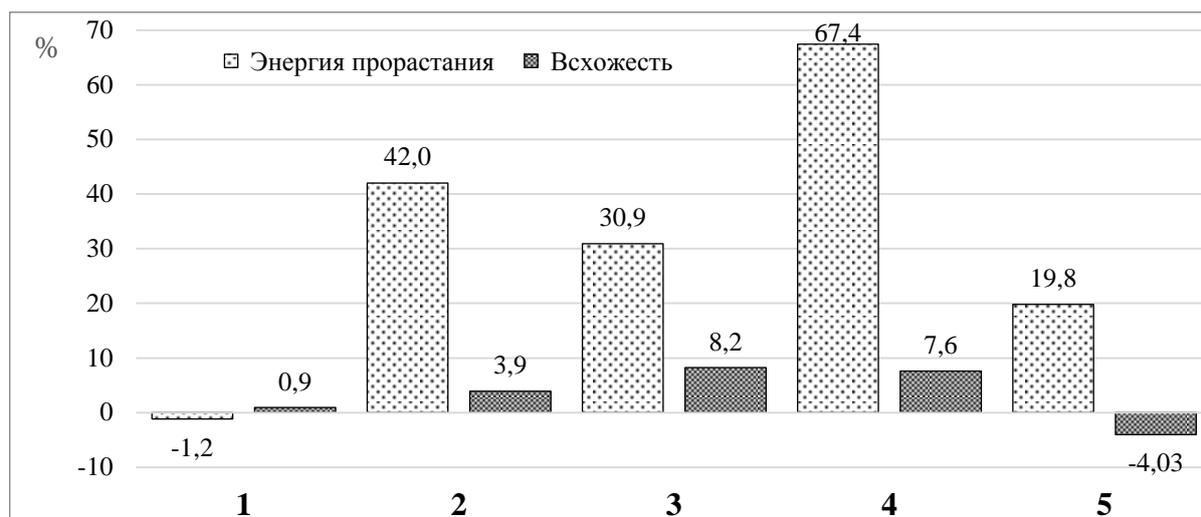
Определение эффективных концентраций тетрасукцината эпикастастерона в лабораторных условиях.

Результаты скрининга рострегулирующей активности S439 показали, что на энергию прорастания раствор в минимальной концентрации (10^{-11} М) влияния практически не оказал (рисунок 1). В максимальной дозе (10^{-7} М) он вызвал ее повышение почти на 20 %, хотя ранее с другими конъюгатами ЭК наблюдалось уменьшение этого показателя, но отличие от контроля было недостоверным (таблица 1).

Растворы в трех средних используемых концентрациях (10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} М) вызвали очень сильное и достоверное увеличение энергии прорастания на 42,0, 30,9 и 67,4 % соответственно, и при этом максимальные разница и достоверность наблюдалась в варианте с концентрацией 10^{-8} М (+ 67,4 % по сравнению с контролем).

На всхожесть этот препарат оказал более слабое влияние, хотя в целом прослеживалась та же закономерность (рисунок 2). Но раствор с концентрацией 10^{-11} М вызвал незначительное недостоверное повышение этого показателя, а 10^{-7} М – такое же недостоверное снижение, хотя на энергию прорастания они влияли противоположным образом.

В остальных трех вариантах (10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} М) наблюдалось повышение всхожести, достоверное при использовании раствора с концентрациями 10^{-9} и 10^{-8} М, причем максимальное – при концентрации 10^{-9} , а не 10^{-8} М, как для энергии прорастания (таблица 1).



1 – $S439, 10^{-11}$ М; 2 – $S439, 10^{-10}$ М; 3 – $S439, 10^{-9}$ М; 4 – $S439, 10^{-8}$ М; 5 – $S439, 10^{-7}$ М

Рисунек 1 – Влияние тетрасукцината 24-эпикастестерона на энергию прорастания и всхожесть гречихи посевной сорта Влада в лабораторном эксперименте, % относительно контроля

Таблица 1 – Влияние тетрасукцината 24-эпикастестерона на энергию прорастания и всхожесть гречихи посевной сорта Влада в лабораторном эксперименте

Показатель	Энергия прорастания		Всхожесть		
	Концентрация, М	%	% к контролю	%	% к контролю
Контроль		$40,5 \pm 2,20$	100,0	$81,8 \pm 2,02$	100,0
10^{-11}		$40,0 \pm 2,56$	98,8	$82,5 \pm 2,67$	100,9
10^{-10}		$57,5 \pm 4,88^{**}$	141,98	$85,0 \pm 1,81$	103,9
10^{-9}		$53,0 \pm 9,14^*$	130,9	$88,5 \pm 2,20^*$	108,2
10^{-8}		$67,8 \pm 4,35^{***}$	167,4	$88,0 \pm 1,85^*$	107,6
10^{-7}		$48,5 \pm 4,07$	119,8	$78,5 \pm 3,70$	95,97

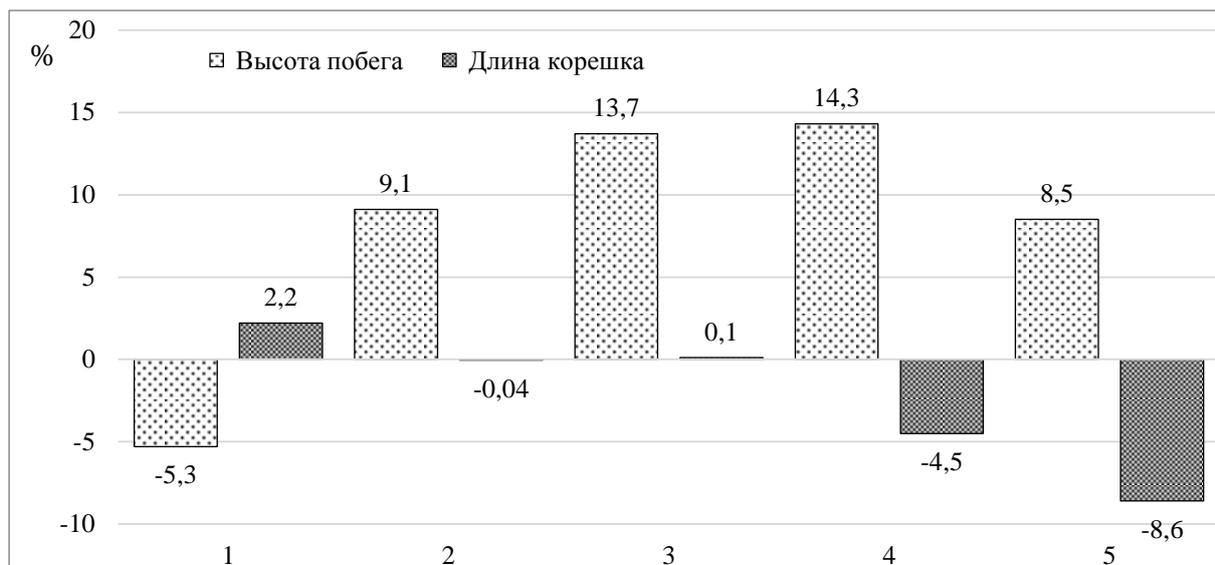
Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.

На высоту проростков S439 оказал более слабое влияние, чем на энергию прорастания, но более сильное, чем на всхожесть (рисунек 2). При использовании минимальной дозы препарата она недостоверно понизилась на 5,3 %, а в остальных вариантах проявилось положительное, но выраженное в разной степени действие. Максимальный положительный эффект с максимально достоверным отличием от контроля вызвала обработка семян растворами с концентрациями 10^{-9} и 10^{-8} М, которая привела к увеличению высоты проростков на 13,7 и 14,3 % соответственно (таблица 2).

Растворы с концентрациями 10^{-10} и 10^{-7} М действовали слабее, но также положительно, там этот показатель вырос на 9,1 и 8,5 %, при этом различия с контролем были достоверными.

На длину корешков S439 оказал отрицательное влияние, вызвав ингибирование их роста, особенно при использовании концентраций 10^{-8} и 10^{-9} М, где этот показатель достоверно уменьшился на 4,5 и 8,6 % соответственно (рисунек 2). Небольшое и недостоверное по сравнению с контролем повышение на 2,2 % наблюдалось только при применении препарата в минимальной дозе, а растворы с концентрациями 10^{-10} и 10^{-9} М не вызвали практически никакого эффекта (таблица 2).

Аналогичные эффекты мы наблюдали и в ранее проведенных аналогичных экспериментах на различных культурах как с самими брассиностероидами, так и с другими конъюгатами эпикастестерона.



1 – S439, 10^{-11} М; 2 – S439, 10^{-10} М; 3 – S439, 10^{-9} М; 4 – S439, 10^{-8} М; 5 – S439, 10^{-7} М

Рисунок 2 – Влияние тетраэпикастерона 24-эпикастерона на высоту побега и длину корешка гречихи посевной сорта Влада в лабораторном эксперименте, % относительно контроля

Таблица 2 – Влияние тетраэпикастерона 24-эпикастерона на высоту проростков и длину корешков гречихи посевной сорта Влада в лабораторном эксперименте

Показатель	Высота проростка		Длина корешка	
	мм	% к контролю	мм	% к контролю
Контроль	71,4 ± 1,68	100,0	76,72 ± 1,11	100,0
10^{-11}	67,6 ± 1,71	94,7	78,40 ± 1,24	102,2
10^{-10}	77,9 ± 2,05*	109,1	76,69 ± 0,94	99,96
10^{-9}	81,2 ± 2,01***	113,7	76,83 ± 1,04	100,1
10^{-8}	81,6 ± 2,03***	114,3	73,23 ± 1,16*	95,5
10^{-7}	77,5 ± 1,74**	108,5	70,10 ± 1,23**	91,4

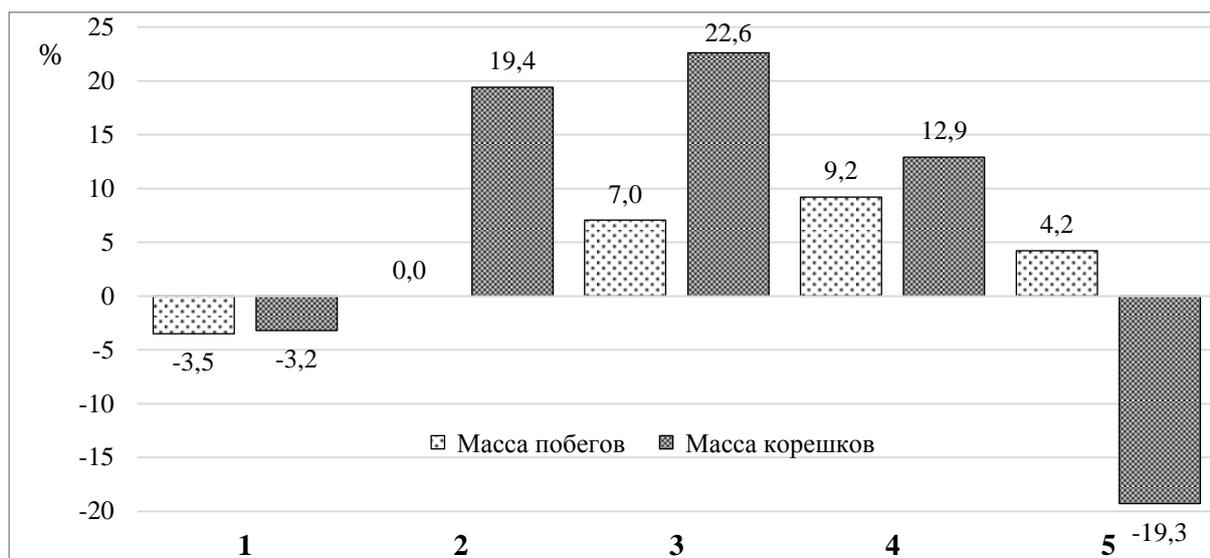
Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.

На массу надземной части гречихи влияние растворов S439 было аналогичным их влиянию на высоту проростков, но количественно результаты отличались. По сравнению с контролем масса 10 проростков увеличилась во всех вариантах, кроме варианта с концентрацией 10^{-11} М (снижение на 3,5 %) (рисунок 3).

Повышение наблюдалось только в трех вариантах с дозами S439 10^{-9} , 10^{-8} и 10^{-7} М, где оно составило 7,0, 9,2 и 4,2 % по отношению к контролю соответственно, но отличия от контроля были недостоверными, что связано с меньшей повторностью.

Влияние S439 на массу корешков не совпадало с их влиянием на их длину. Так, применение для замачивания семян растворов с концентрациями 10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} М привело к повышению этого показателя на 19,4, 22,6 и 12,9 %, причем для первых двух вариантов различия с контролем были достоверными, несмотря на сравнительно небольшую повторность эксперимента (таблица 3).

Использование дозы 10^{-11} и 10^{-7} М вызвало снижение массы корней на 3,2 и 19,3 % соответственно, причем в варианте с использованием максимальной концентрации оно также было достоверным (рисунок 3). Но такое несоответствие влияния на эти показатели мы отмечали ранее и при анализе влияния БС и других конъюгатов.



1 – S439, 10^{-11} M; 2 – S439, 10^{-10} M; 3 – S439, 10^{-9} M; 4 – S439, 10^{-8} M; 5 – S439, 10^{-7} M

Рисунок 3 – Влияние тетраСУКЦИНАТА 24-эпикастастерона на массу побегов и корешков гречихи посевной сорта Влада в лабораторном эксперименте, % относительно контроля

Таблица 3 – Влияние тетраСУКЦИНАТА 24-эпикастастерона на массу проростков и корешков гречихи посевной сорта Влада в лабораторном эксперименте

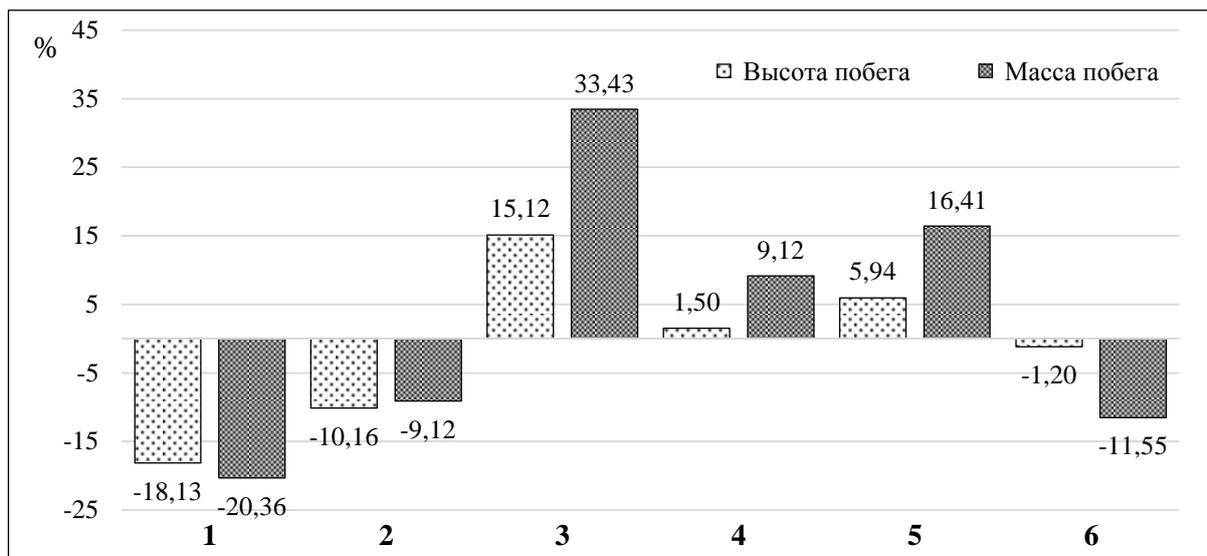
Показатель	Масса 10 проростков		Масса 10 корешков	
	г	% к контролю	г	% к контролю
Контроль	1,42 ± 0,06	100,0	0,31 ± 0,03	100,0
10^{-11}	1,37 ± 0,08	96,5	0,30 ± 0,03	96,8
10^{-10}	1,42 ± 0,06	100,0	0,37 ± 0,02*	119,4
10^{-9}	1,52 ± 0,05	107,04	0,38 ± 0,02*	122,6
10^{-8}	1,55 ± 0,05	109,2	0,35 ± 0,02	112,9
10^{-7}	1,48 ± 0,05	104,2	0,25 ± 0,01*	80,7

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

Таким образом, обработка семян гречихи посевной растворами S439 вызывала (в зависимости от концентрации) эффекты с различным знаком. Но положительный эффект был более значимым, чем в экспериментах с другими конъюгатами ЭК. Возможно, это объясняется тем, что сама янтарная кислота является эффективным биостимулятором и широко применяется в растениеводстве или в качестве индивидуального соединения, или в составе комбинированных препаратов, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь. Для исследований в вегетационном опыте на основе анализа комплекса показателей было решено оставить три концентрации: 10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} M.

Влияние эпикастастерона и его тетраСУКЦИНАТА на морфометрические показатели гречихи посевной в вегетационном эксперименте.

Оба препарата оказали на морфометрические параметры неоднозначное влияние (рисунок 4). Раствор ЭК в концентрации 10^{-10} M уменьшил высоту проростков на 18,1 %, а их массу – на 20,4 %. В средней используемой дозе (10^{-9} M) наблюдалось более слабое подавление – на 10,2 и 9,1 % соответственно, достоверное только для высоты побегов. Только применение раствора ЭК с концентрацией 10^{-8} M приводило к значительному и достоверному увеличению обоих показателей на 15,1 и 33,4 % соответственно (таблица 4).



1 – ЭК, 10^{-10} М; 2 – ЭК, 10^{-9} М; 3 – ЭК, 10^{-8} М; 4 – S439, 10^{-10} М; 5 – S439, 10^{-9} М; 6 – S439, 10^{-8} М

Рисунок 4 – Влияние 24-эпикастерона и его тетраСУКЦИНАТА на высоту и массу надземной части гречихи посевной сорта Влада, % относительно контроля

Таблица 4 – Влияние 24-эпикастерона и тетраСУКЦИНАТА 24-эпикастерона на высоту проростков гречихи посевной сорта Влада и их массу в вегетационном эксперименте

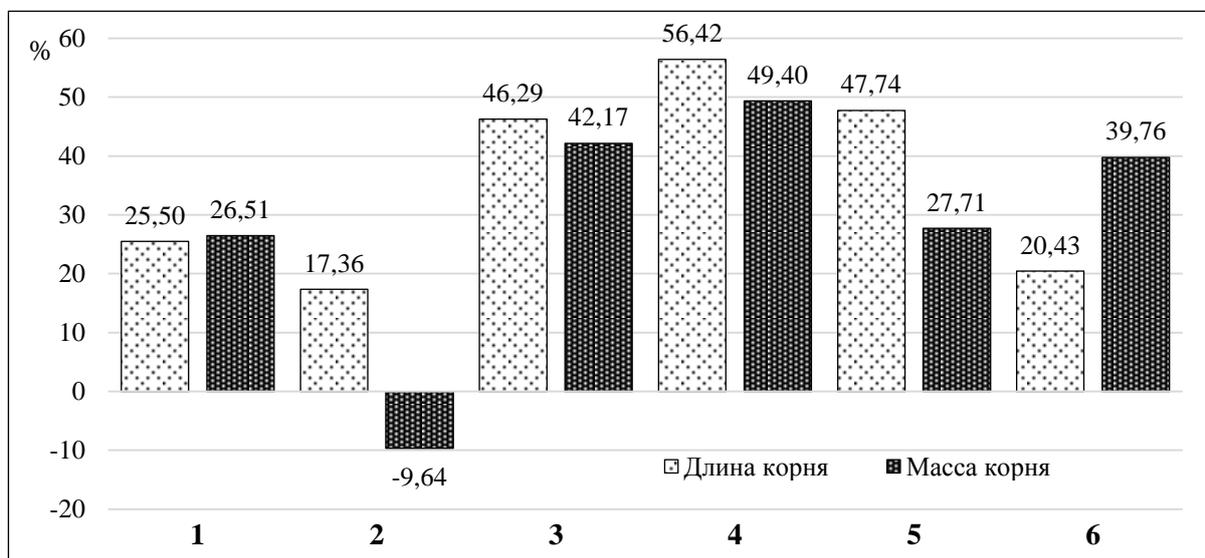
Показатель	Высота проростка		Масса проростков	
	мм	% к контролю	г	% к контролю
24-эпикастерон (ЭК)				
Контроль	132,9 ± 3,20	100,0	0,329 ± 0,029	100,0
10^{-10}	108,8 ± 1,66***	81,9	0,262 ± 0,031	79,6
10^{-9}	119,4 ± 1,41**	89,8	0,299 ± 0,023	90,9
10^{-8}	153,0 ± 1,38***	115,1	0,439 ± 0,024**	133,4
ТетрасуКЦИНАТ 24-эпикастерона (S439)				
10^{-10}	134,9 ± 1,92	101,5	0,359 ± 0,024	109,1
10^{-9}	140,8 ± 1,21*	105,9	0,383 ± 0,019*	116,4
10^{-8}	131,3 ± 1,43	98,8	0,291 ± 0,024	88,4

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

Раствор S439 в дозе 10^{-10} М вызвал незначительное повышение показателей (на 1,5 и 9,1 % соответственно). Более выраженное стимулирующее влияние оказала средняя доза (10^{-9} М), при которой наблюдалось достоверное увеличение высоты и массы проростков на 5,9 и 16,4 % соответственно. Раствор с концентрацией 10^{-8} М, наоборот, уменьшил значение обоих показателей на 1,2 и 11,6 % соответственно, но разница с контролем была недостоверной (таблица 4).

Таким образом, в вегетационном эксперименте S439 проявил менее выраженное стимулирующее влияние на надземную часть гречихи, чем сам ЭК, но оно наблюдалось при использовании более низких доз. Результаты отличались и от результатов эксперимента, проведенного рулонным методом, где более чувствительным показателем была высота побегов, а не их масса. Более сильное стимулирующее влияние обоих препаратов проявилось при их действии на корневую систему (рисунок 5). Растворы ЭК увеличили длину корней во всех вариантах, но наиболее значимо при дозе 10^{-8} М (на 46,3 % по отношению к контролю).

На близкое значение – 42,2 % увеличилась и их масса (таблица 5). Раствор с минимальной концентрацией ЭК действовал примерно наполовину слабее – повышение показателей составило 25,5 и 26,5 % соответственно, но различия с контролем были достоверными только для длины корешков. При использовании средней дозы длина корней увеличивалась на 17,4 %, а их масса уменьшалась на 9,5 %, но различия были недостоверными для обоих показателей.



1 – ЭК, 10⁻¹⁰ M; 2 – ЭК, 10⁻⁹ M; 3 – ЭК, 10⁻⁸ M; 4 – S439, 10⁻¹⁰ M; 5 – S439, 10⁻⁹ M; 6 – S439, 10⁻⁸ M

Рисунок 5 – Влияние 24-эпикастерона и его тетрасахарината на длину и массу подземной части гречихи посевной сорта Влада, % относительно контроля

Таблица 5 – Влияние 24-эпикастерона и тетрасахарината 24-эпикастерона на длину корешков гречихи посевной сорта Влада и их массу в вегетационном эксперименте

Показатель	Длина корешка		Масса корешка	
	мм	% к контролю	г	% к контролю
24-эпикастерон (ЭК)				
Контроль	27,65 ± 1,61	100,0	0,083 ± 0,008	100,0
10 ⁻¹⁰	34,70 ± 2,87*	125,5	0,105 ± 0,010	126,5
10 ⁻⁹	32,45 ± 2,41	117,4	0,075 ± 0,009	90,4
10 ⁻⁸	40,45 ± 4,30**	146,3	0,118 ± 0,007**	142,2
Тетрасахаринат 24-эпикастерона (S439)				
10 ⁻¹⁰	43,25 ± 2,74***	156,4	0,124 ± 0,009*	149,4
10 ⁻⁹	40,85 ± 2,92***	147,7	0,106 ± 0,010	127,7
10 ⁻⁸	33,30 ± 2,83	120,4	0,116 ± 0,014*	139,8

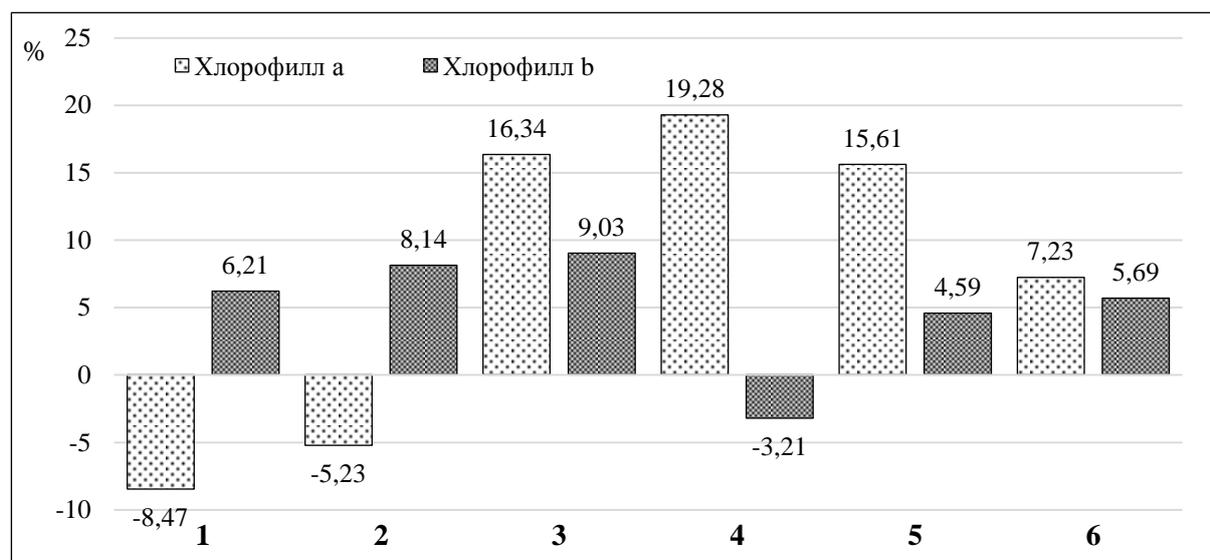
Примечание – * – достоверно при $P \leq 0,05$; ** – при $P \leq 0,01$; *** – при $P \leq 0,001$.

Раствор S439 проявил максимальное стимулирующее и достоверное действие на оба показателя в минимальной дозе 10⁻¹⁰ M, увеличив длину и массу корней на 56,4 и 49,4 % соответственно, но максимальная достоверность наблюдалась только для длины корешков. При применении концентрации 10⁻⁹ M значения уменьшались до 47,4 и 27,7 % соответственно, и отличие от контроля также было достоверным только для длины корней. Раствор с концентрацией 10⁻⁸ M увеличивал оба показателя на 20,4 и 39,8 % соответственно, и разница с контролем была достоверной только для массы корней. Таким образом, S439 в вегетационном опыте проявил более выраженное сти-

мулирующее влияние на подземную, а не надземную часть гречихи, и при этом максимально при использовании самой низкой дозы.

Влияние эпикастастерона и его тетраСУКЦИНАТА на содержание фотосинтетических пигментов в листьях гречихи посевной в вегетационном эксперименте.

Влияние исследуемых соединений на содержание фотосинтетических пигментов не коррелировало полностью с их влиянием на морфометрические показатели (рисунок 6). Эпикастастерон в минимальных концентрациях (10^{-10} и 10^{-9} М) снижал содержание хлорофилла *a* на 8,5 и 5,2 % соответственно, несколько повышая содержание хлорофилла *b* (на 6,2 и 8,1 %). ЭК в дозе 10^{-8} М значительно повышал содержание обоих пигментов (на 16,3 и 9,0 %) (таблица 6).



1 – ЭК, 10^{-10} М; 2 – ЭК, 10^{-9} М; 3 – ЭК, 10^{-8} М; 4 – S439, 10^{-10} М; 5 – S439, 10^{-9} М; 6 – S439, 10^{-8} М

Рисунок 6 – Влияние 24-эпикастастерона и его тетраСУКЦИНАТА на содержание хлорофиллов *a* и *b* в листьях гречихи посевной сорта Влада, % относительно контроля

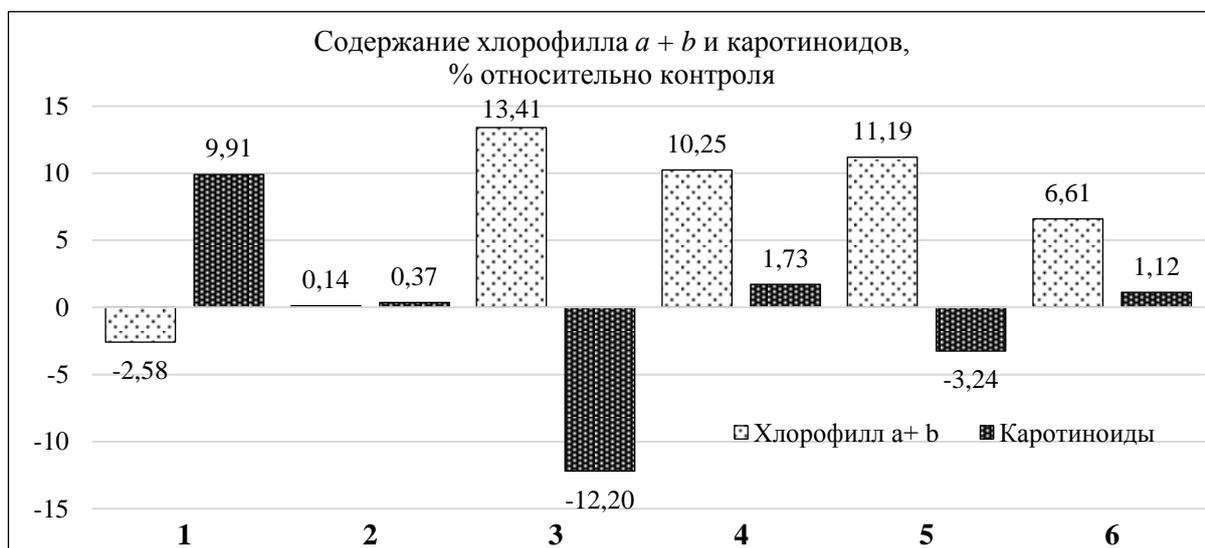
Таблица 6 – Влияние 24-эпикастастерона и тетраСУКЦИНАТА 24-эпикастастерона на содержание хлорофилла *a* и *b* в листьях гречихи посевной сорта Влада в вегетационном эксперименте

Содержание Концентрация, М	Хлорофилл <i>a</i>		Хлорофилл <i>b</i>	
	мг/г	% к контролю	мг/г	% к контролю
24-эпикастастерон (ЭК)				
Контроль	0,650 ± 0,026	100,0	0,436 ± 0,018	100,0
10^{-10}	0,595 ± 0,031	91,5	0,463 ± 0,020	106,2
10^{-9}	0,616 ± 0,029	94,8	0,471 ± 0,023	108,1
10^{-8}	0,756 ± 0,019*	116,3	0,475 ± 0,0148	109,0
ТетрасуКЦИНАТ 24-эпикастастерона (S439)				
10^{-10}	0,775 ± 0,021**	119,3	0,422 ± 0,019	96,8
10^{-9}	0,751 ± 0,024*	115,6	0,456 ± 0,022	104,6
10^{-8}	0,697 ± 0,034	107,2	0,461 ± 0,017	105,7

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

Максимальное повышение содержания хлорофилла *a* (на 19,3 %) наблюдалось при использовании раствора S439 в концентрации 10^{-10} М, но при этом количество хлорофилла *b* недостоверно уменьшилось (на 3,2 %). Средняя доза (10^{-9} М) S439 по-

вышала содержание обоих пигментов на 15,6 и 4,6 % соответственно (таблица 6). Максимальная доза оказывала положительное, но более слабое и недостоверное влияние на оба показателя (+ 7,2 и 5,7 % соответственно). Суммарное содержание хлорофилла ниже контроля было только в варианте с раствором ЭК в концентрации 10^{-10} М (-2,6 %) (рисунок 7). В этом же варианте было максимально повышено (на 9,9 %) содержание каротиноидов, возможно, как компенсация снижению уровня хлорофилла, но отличия от контроля были недостоверными (таблица 7). ЭК в дозе 10^{-8} М максимально (на 13,4 %) повысил уровень хлорофилла и снизил (на 12,2 %) содержание каротиноидов. S439 во всех вариантах увеличил содержание зеленых пигментов, причем значения для концентраций 10^{-10} и 10^{-9} М были достаточно близки – 10,3 и 11,2 % соответственно, но достоверными были различия только для большей дозы препарата. Влияние на содержание каротиноидов достоверно от контроля не отличалось: при концентрации 10^{-10} М оно было на 1,7 % выше, а 10^{-9} М – на 3,2 % ниже уровня контроля. В максимальной концентрации (10^{-8} М) S439 действовал достаточно слабо, недостоверно увеличив содержание хлорофилла на 6,6 %, а каротиноидов – на 1,1 %.



1 – ЭК, 10^{-10} М; 2 – ЭК, 10^{-9} М; 3 – ЭК, 10^{-8} М; 4 – S439, 10^{-10} М; 5 – S439, 10^{-9} М; 6 – S439, 10^{-8} М

Рисунок 7 – Влияние 24-эпикастерона и его тетраСУКЦИНАТА на суммарное содержание хлорофиллов *a + b* и каротиноидов в листьях гречихи посевной, % относительно контроля

Таблица 7 – Влияние 24-эпикастерона и его тетраСУКЦИНАТА на суммарное содержание фотосинтетических пигментов в листьях гречихи посевной сорта Влада в вегетационном эксперименте

Содержание Концентрация, М	Суммы хлорофилла <i>a</i> и <i>b</i>		Каротиноиды	
	мг/г	% к контролю	мг/г	% к контролю
24-эпикастерон (ЭК)				
Контроль	1,086 ± 0,021	100,0	0,294 ± 0,018	100,0
10^{-10}	1,058 ± 0,026	97,4	0,323 ± 0,020	109,9
10^{-9}	1,087 ± 0,025	100,1	0,295 ± 0,023	100,4
10^{-8}	1,232 ± 0,016*	113,4	0,258 ± 0,014*	87,8
ТетрасуКЦИНАТ 24-эпикастерона (S439)				
10^{-10}	1,197 ± 0,020	110,3	0,299 ± 0,019	101,7
10^{-9}	1,207 ± 0,023*	111,2	0,284 ± 0,022	96,8
10^{-8}	1,158 ± 0,026	106,6	0,297 ± 0,017	101,1

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

Заклучение

Раствор тетрасукуцината 24-эпикастастерона при проращивании гречихи посевной сорта Влада рулонным методом при использовании концентраций 10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} М вызывал положительный эффект по большинству морфометрических показателей, и при этом он был более значимым, чем в ранее проведенных аналогичных экспериментах с другими конъюгатами 24-эпикастастерона.

В вегетационном опыте с использованием почвогрунта тетрасукуцинат эпикастастерона во всех трех используемых концентрациях показал менее выраженную ростстимулирующую активность по отношению к надземной части по сравнению с раствором 24-эпикастастерона в концентрации 10^{-8} М, но достаточно высокую – по отношению к корневой системе при использовании растворов с концентрациями 10^{-10} и 10^{-9} М. Влияние этого конъюгата 24-эпикастастерона с янтарной кислотой в тех же двух минимальных дозах на содержание фотосинтетических пигментов также было сравнимо с действием самого брассиностероида в более высокой дозе (10^{-8} М).

На основе анализа всего комплекса полученных при исследованиях показателей для проведения полевого эксперимента решено оставить три концентрации тетрасукуцината 24-эпикастастерона и для сравнения самого эпикастастерона: 10^{-10} , 10^{-9} и 10^{-8} М.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дерфлинг, К. Н. Гормоны растений / К. Н. Дерфлинг. – М. : Наука, 1989. – 351 с.
2. Nayat, S. Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones / S. Nayat, A. Ahmad. – Dordrecht : Springer, 2011. – 462 p.
3. Хрипач, В. А. Брассиностероиды / В. А. Хрипач, Ф. А. Лахвич, В. Н. Жабинский. – Минск : Навука і тэхніка, 1993. – 287 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. Биологическая активность брассиностероидов и стероидных гликозидов / С. Э. Кароза [и др.] ; под общ. ред. С. Э. Карозы. – Брест : БрГУ, 2020. – 260 с.
6. 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.
7. 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.
8. Коваленко, В. В. Влияние эпикастастерона и его конъюгатов на морфометрические и физиолого-биохимические параметры тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.) / В. В. Коваленко // *Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі.* – 2022. – № 1. – С. 22–30.
9. Хомюк, Я. В. Влияние эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами на морфометрические и физиолого-биохимические параметры *Trifolium pratense* L. / Я. В. Хомюк, Е. Г. Артемук, Р. П. Литвиновская // *Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі.* – 2022. – № 2. – С. 52–62.
10. Артемук, Е. Г. Рострегулирующее и антистрессовое действие эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами на *Trifolium pratense* L. в условиях влияния ионов свинца / Е. Г. Артемук // *Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі.* – 2023. – № 1. – С. 5–15.
11. Коваленко, В. В. Протекторная активность 24-эпикастастерона и тетраиндолилацетата 24-эпикастастерона в отношении токсического действия ионов свинца

на культуре тимофеевки луговой (*Phleum pratense* L.) / В. В. Коваленко // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2023. – № 1. – С. 31–40.

12. Корзюк, О. В. Протекторное действие эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами на растения гороха посевного в условиях влияния ионов свинца / О. В. Корзюк // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2023. – № 1. – С. 41–51.

13. Тарасюк, А. Н. Протекторные свойства эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами по отношению к токсическому действию ионов свинца и кадмия на клетки корневой меристемы сельскохозяйственных культур / А. Н. Тарасюк // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2023. – № 1. – С. 60–69.

14. Кароза, С. Э. Влияние эпикастастерона и его конъюгатов с кислотами на морфометрические показатели гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum* Moench.) в лабораторных условиях / С. Э. Кароза // Проблемы оценки, мониторинга и сохранения биоразнообразия : сб. материалов IV Респ. науч.-практ. экол. конф., Брест, 25 нояб. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол.: Н. М. Матусевич, Н. В. Шкурадова, М. В. Левковская. – Брест : БрГУ, 2021. – С. 90–94.

15. Кароза, С. Э. Анализ рострегулирующей активности конъюгатов эпикастастерона с органическими кислотами на примере гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum* Moench.) / С. Э. Кароза // Биотехнология: достижения и перспективы развития : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Пинск, 25–26 нояб. 2021 г. / Полес. гос. ун-т ; редкол.: В. И. Дунай [и др.]. – Пинск, 2021. – С. 79–84.

16. Государственный реестр сортов Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sorttest.by/gosudarstvennyu-reyestr-sortov-2022>. – Дата доступа: 29.11.2023.

17. Влада [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.agronomu.com/bok/2717-znakomimsya-s-osnovnymi-sortami-grechih.html#h-id-2>. – Дата доступа: 03.02.2021.

18. Гречиха сорта Влада [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.sorttest.by/grechih.pdf>. – Дата доступа: 03.02.2021.

19. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038-84. – Введ. 01.07.86. – М. : Стандартинформ, 2011. – 29 с.

20. Гавриленко, В. Ф. Большой практикум по фотосинтезу / В. Ф. Гавриленко, Т. В. Жигалова ; под ред. И. П. Ермакова – М. : Академия, 2003. – 256 с.

21. 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.

22. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Ураджай, 1973. – 320 с.

REFERENCES

1. Derfling, K. N. Gormony rastienij / K. N. Derfling. – М. : Nauka, 1989. – 351 s.
2. Hayat, S. Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones / S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht : Springer, 2011. – 462 p.
3. Khripach, V. A. Brassinosteroidy / V. A. Khripach, F. A. Lakhvich, V. N. Zhabinskij. – Minsk : Navuka i tekhnika, 1993. – 287 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. Biologichieskaja aktivnost' brassinosteroidov i steroidnykh glikozidov / S. E. Karoza [i dr.] ; pod obshch. ried. S. E. Karozy. – Brest : BrSU, 2020 – 260 s.
6. Sintez i stress-protektornoje dejstvije na rastienija konjugatov brassinosteroidov s salicilovoj kislotoj / R. P. Litvinovskaja [i dr.] // Khimija prirod. sojedinenij. – 2016. – № 3. – S. 394–398.
7. Zashchitnoje dejstvije salicilatov brassinosteroidov na rastienija jarovogo jachmienia, podviergnutykh biotichieskomu stressu / N. Ye. Manzheliesova [i dr.] // Dokl. NAN Bielarusi. – 2019. – T. 63, № 3. – S. 304–311.
8. Kovalienko, V. V. Vlijanije epikastasterona i jego konjugatov na morfometri-chieskije i fiziologo-biokhimichieskije paramietry timofiejevki lugovoj (*Phleum pratense* L.) / V. V. Kovalienko // Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2022. – № 1. – S. 22–30.
9. Khomiuk, Ya. V. Vliyanije epikastasterona i jego konjugatov s kislotami na morfo-mietrichieskije i fiziologo-biokhimichieskije paramietry *Trifolium pratense* L. / Ya. V. Khomiuk, Ye. G. Artiemuk, R. P. Litvinovskaja // Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2022. – № 2. – S. 52–62.
10. Artiemuk, Ye. G. Rostrigulirujushchieje i antistressovoje dejstvije epikastaste-rona i jego konjugatov s kislotami na *Trifolium pratense* L. v uslovijakh vlijanija ionov svinca / Ye. G. Artiemuk // Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2023. – № 1. – S. 5–15.
11. Kovalienko, V. V. Protektornaja aktivnost' 24-epikastasterona i tetraindolilacetata 24-epikastasterona v otnoshenii toksichieskogo dejstvija ionov svinca na kul'turie timofiej-jevki lugovoj (*Phleum pratense* L.) / V. V. Kovalienko // Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2023. – № 1. – S. 31–40.
12. Korziuk, O. V. Protektornoje dejstvije epikastasterona i jego konjugatov s kislota-mi na rastienija gorokha posievnogo v uslovijakh vlijanija ionov svinca / O. V. Korziuk // Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2023. – № 1. – S. 41–51.
13. Tarasiuk, A. N. Protektornyje svojstva epikastasterona i jego konjugatov s kislota-mi po otnosheniju k toksichieskomu dejstviju ionov svinca i kadmija na klietki kornievoj mieristiemy siel'skokhoziajstviennykh kul'tur / A. N. Tarasiuk // Viesn. Besc. un-ta. Sier. 5, Bijalohija. Navuki ab ziamli. – 2023. – № 1. – S. 60–69.
14. Karoza, S. E. Vlijanije epikastasterona i jego konjugatov s kislotami na morfomet-ri-chieskije pokazateli griechikhi posievnnoj (*Fagopyrum esculentum* Moench.) v laborator-nykh uslovijakh / S. E. Karoza // Problemy ocenki, monitoringa i sokhranienija biorazno-obrazija : sb. materialov IV Riesp. nauch.-prakt. ekol. konf., Brest, 25 nojab. 2021 g. / Brest. gos. un-t im. A. S. Pushkina ; riedkol.: N. M. Matusievich, N. V. Shkuratova, M. V. Lievkov-skaja. – Brest : BrGU, 2021. – S. 90–94.
15. Karoza, S. E. Analiz rostrigulirujushchiej aktivnosti konjugatov epikastasterona s organichieskimi kislotami na primierie griechikhi posievnnoj (*Fagopyrum esculentum* Moench.) / S. E. Karoza // Biotiekhnologija: dostizhenija i pierspektivy razvitija : sb. matie-rialov V Miezhdunar. nauch.-prakt. konf., Pinsk, 25–26 nojab. 2021 g. / Polies. gos. un-t ; riedkol.: V. I. Dunaj [i dr.]. – Pinsk, 2021. – S. 79–84.
16. Gosudarstviennyj riejeestr sortov Riespubliki Belarus' [Elektronnyj riesurs]. – Riezhim dostupa: <http://sorttest.by/gosudarstvennyy-reyestr-sortov-2022>. – Data dostupa: 29.11.2023.
17. Vlada [Elektronnyj riesurs]. – 2021. – Riezhim dostupa: <https://www.agronomu.-com/bok/2717-znakomimsya-s-osnovnymi-sortami-grechih.html#h-id-2>. – Data dostupa: 03.02.2021.
18. Griechikha sorta Vlada [Elektronnyj riesurs]. – 2021. – Riezhim dostupa: <https://www.sorttest.by/grechih.pdf>. – Data dostupa: 03.02.2021.

19. Siemiena siel'skokhoziajstviennykh kul'tur. Mietody opriedielienija vskhozhesti : GOST 12038-84. – Vvied. 01.07.86. – M. : Standartinform, 2011. – 29 s.

20. Gavrilienko, V. F. Bol'shoj praktikum po fotosintezu / V. F. Gavrilienko, T. V. Zhigalova ; pod ried. I. P. Jermakova. – M. : Akadiemija, 2003. – 256 s.

21. Shul'gin, I. A. Raschiot sodierzhanija pigmentov 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.

22. Rokickij, P. F. Biologichieskaja statistika / P. F. Rokickij. – Minsk : Uradzhaj, 1973. – 320 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 05.07.2024