

DOI: 10.7868/S3034574X26010071
УДК 631.811+577.175

Оригинальная статья

ВЛИЯНИЕ ФЕНОЛКАРБОНОВЫХ КИСЛОТ НА БАЛАНС СТЕРОИДНЫХ ГОРМОНОВ В РАСТЕНИЯХ ТРИТИКАЛЕ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ

Р.П. Литвиновская*, А.Л. Савчук, Д.В. Денисюк, Л.Е. Каргыжова, В.А. Хрипач

Государственное научное учреждение «Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси»,
Минск, Республика Беларусь

*E-mail: litvin@iboch.by

Аннотация. Впервые изучено влияние экзогенных фенолкарбонových кислот (феруловой, галловой, салициловой, ацетилсалициловой и *n*-кумаровой) на содержание brassinosteroidов (группы brassinolida, 24-эпибрасинолида, 28-гомобрасинолида, В-лактон-, В-кетон- и В-дезоксопроизводных) на ранних стадиях развития растений тритикале. Показано, что стероид-гормональный статус растений менялся при обработке фенолкарбонowymi кислотами, так как содержание практически всех БС уменьшалось в расчете на единицу массы растения и зависело от структуры кислоты и ее концентрации. Установлено, что через 14 сут после обработки все изученные кислоты приводили к увеличению роста на 6–10 % и значительному увеличению веса проростков по сравнению с контролем. Наиболее активными оказались феруловая (увеличение сырой массы на 38–47 %) и ацетилсалициловая кислоты (40–43 %) в концентрациях 10^{-7} и 10^{-9} М соответственно, а также галловая кислота в концентрации 10^{-7} М (50 %). Изменения, обусловленные регуляторным действием фенолкарбонových кислот, могут иметь прямое значение для оценки адаптационного потенциала растений и последующей биорегуляторной коррекции в агротехнологиях.¹

Ключевые слова: brassinosteroidы, тритикале (*Triticosecale* Wittmack), фенолкарбонových кислоты, ростостимулирующая активность, иммуноферментный анализ

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Х23РНФ-087).

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

Ссылка для цитирования: Литвиновская Р.П., Савчук А.Л., Денисюк Д.В., Каргыжова Л.Е., Хрипач В.А. Влияние фенолкарбонových кислот на баланс стероидных гормонов в растениях тритикале на начальной стадии развития. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 1. С. 91–102. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26010071>

© Р. П. Литвиновская, А. Л. Савчук, Д. В. Денисюк, Л. Е. Каргыжова, В. А. Хрипач, 2026

¹ Сокращения: БС — brassinosteroidы; АФК — активные формы кислорода; ЭБ — 24-эпибрасинолид; ОП — оптическая плотность.

EFFECT OF PHENOLCARBOXYLIC ACIDS ON THE BALANCE OF STEROID HORMONES IN TRITICALE PLANTS AT THE INITIAL STAGE OF DEVELOPMENT

R.P. Litvinovskaya*, A.L. Sauchuk, D.V. Denisiuk, L.E. Kartyzhova, V.A. Khripach

Institute of Bioorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

*E-mail: litvin@iboch.by

Abstract. The effect of exogenous phenolic carboxylic acids (ferulic, gallic, salicylic, acetylsalicylic and p-coumaric) on the content of brassinosteroids (brassinolide group, 24-epibrassinolide, 28-homobrassinolide, B-lactone, B-ketone and B-deoxo derivatives) in the early stages of triticale plant development was studied. It has been shown that the steroid-hormonal status of plants changes when treated with phenolic acids (the content of almost all BS decreases per unit of plant mass) and depends on the structure of the acid used and its concentration. It was found that 14 days after treatment, all the studied acids lead to an increase in growth (by 6–10 %) and a significant increase in the weight of seedlings compared to the control. The most active at concentrations of 10^{-7} and 10^{-9} M were ferulic (an increase in raw weight by 38–47 %) and acetylsalicylic acid (40–43 %), as well as gallic acid at a concentration of 10^{-7} M (50 %). Changes caused by the regulatory action of phenolcarboxylic acids may have direct significance for assessing the adaptive potential of plants and subsequent bioregulatory correction in agricultural technologies.

Keywords: brassinosteroids, triticale (*Triticosecale* Wittmack), phenolcarboxylic acids, growth-promoting activity, enzyme immunoassay

Funding. This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. X23RSF-087).

Ethics declarations. This work does not contain any studies involving humans or animals.

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.

Authors contribution. All authors made a significant contribution to the development of the concept, conduct of the study, and preparation of the article.

For Citation: Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L., Denisiuk D.V., Kartyzhova L.E., Khripach V.A. Effect of phenolcarboxylic acids on the balance of steroid hormones in triticale plants at the initial stage of development. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(1):91–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26010071>

ВВЕДЕНИЕ

К общим свойствам брассиностероидов (БС) и фенольных соединений можно отнести участие их в процессах роста, проявления регуляторной способности и избирательности действия на растения. Определенная связь между БС и фенольными соединениями просматривается в участии этих веществ в онтогенезе [17]. Брассиностероидов много в семенах, их количество резко снижается в молодых проростках и снова возрастает при формировании семян [15]. Накопление фенольных соединений носит обратный характер [2], то есть эти две группы регуляторов роста как бы дополняют друг друга. Основными функциями БС считается рост растяжением, взаимодействие с другими фитогормонами, участие в формировании вегетативных и генеративных органов растений, защита от стрессов [14].

Одним из главных факторов устойчивости растений к окислительному стрессу является функционирование эффективной многоуровневой антиоксидантной системы, включающей низкомолекулярные соединения, в том числе фенольные соединения [19, 35]. Известно, что многие из них обладают высокой антиоксидантной активностью [38]. Считается, что они способны инактивировать свободные радикалы, а также могут выступать в качестве субстратов для пероксидаз, таким образом защищая растения от активных форм кислорода (АФК) [24, 31].

Взаимоотношения фенольных соединений и БС до конца не выяснены. Рядом авторов отмечено, что экзогенное применение БС влияет на широкий спектр физиологических реакций, накопление вторичных метаболитов (в том числе фенольных соединений) и устойчивость растений к стрессовым факторам [12]. В литературе описан ряд примеров влияния обработки различных растений брассиностероидами, при которой меняется содержание фенольных соединений. Установлено, например, повышение содержания свободных фенолкарбоновых кислот, в частности, оксикоричных, оксикоричных и общей суммы свободных фенолкарбоновых кислот, в растениях ячменя под влиянием 24-эпибрассинолида (ЭБ) [6]. Показано, что действие ЭБ на растения ячменя, зараженные грибом *Helminthosporium teres* Sacc. (*H. teres*), значительно подавляет распространение болезни. Этот эффект связывают, в том числе, с увеличением содержания фенолкарбоновых кислот в растениях [36]. Обработка брассиностероидами растений салата *Cichorium endivia* L., выращенных в полевых условиях, наряду с повышением урожайности привела к увеличению общей антиоксидантной активности и общего количества фенольных соединений [32]. Обработка брассиностероидами при выращивании лаванды *Lavandula intermedia* var. Super положительно влияла на рост растений

и выработку вторичных метаболитов, в том числе фенолов [8]. Опрыскивание виноградных лоз 24-эпибрассинолидом приводило к накоплению фенольных соединений наряду с β -каротином, аскорбиновой кислотой и др. полезными соединениями [9]. При исследовании влияния ЭБ на накопление вторичных метаболитов на иммобилизованных клетках, полученных из *Vitis vinifera* cv. Cinsault, также обнаружено заметное изменение накопления вторичных метаболитов, в том числе фенолов [11].

Ингибирующее влияние на содержание фенольных соединений показано на двух генотипах кукурузы ZP 434 (гибрид нового поколения, засухоустойчивый) и ZP 704 (гибрид старшего поколения, чувствительный к засухе), обработанных различными концентрациями ЭБ [37]. Обработка растений картофеля 24-эпибрассинолидом снижает стресс-индуцируемое накопление фенольных соединений [16]. Применение Эпина (препарат на основе ЭБ) на растениях валерианы лекарственной привело к уменьшению содержания фенолкарбоновых кислот в сырье [1]. Оценка влияния на фитохимические характеристики клубники сорта Camiño Real на четырех стадиях созревания после экзогенного опрыскивания раствором ЭБ показала тенденцию к снижению содержания фенольных соединений, в основном на стадии созревания [10]. Обработка листьев гороха *Vigna sinensis* брассинолидом в концентрации $0,5 \cdot 10^{-7}$ М смягчила солевой стресс за счет стимуляции активности ферментов, ответственных за антиоксидантную защиту, например, супероксиддисмутазы, пероксидазы, полифенолоксидазы, а также за счет повышения содержания аскорбиновой кислоты [21].

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что взаимоотношения БС и фенольных соединений в растениях неоднозначны. До настоящего времени не исследовалось влияние фенольных соединений на содержание эндогенных брассиностероидов в растениях.

В качестве объекта исследования были выбраны растения тритикале (*Triticosecale Wittmack*) сорта Гелио. Это растение как межродовой гибрид пшеницы и ржи сочетает в себе генетическую пластичность и устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды. Эти особенности делают тритикале перспективной модельной культурой для изучения гормональных и биохимических регуляций на ранних стадиях онтогенеза. Кроме того, тритикале характеризуется повышенной биомассой на начальных этапах развития, что позволяет достоверно регистрировать метаболические сдвиги, включая изменения в стероидном профиле [3].

Целью настоящего исследования является изучение влияния экзогенных фенольных кислот (феруловой, галловой, салициловой, ацетилсалициловой и *n*-кумаровой) на начальный рост растений

тритикале сорта Гелио, а также содержание в них БС (группы brassinоида, 24-эпibrassinоида, 28-гомобрassinоида, В-лактон-, В-кетон- и В-дезоксопроизводных).

МЕТОДИКА

В работе использовали фенолкарбоновые кислоты: феруловую кислоту, галловую кислоту, салициловую кислоту (все “Glentham” LifeSciences, UK), ацетилсалициловую кислоту (Борисовский завод медицинских препаратов, Беларусь), п-кумаровую кислоту (Merck, Германия).

Лабораторный вегетационный опыт по изучению влияния органических кислот на биометрические показатели роста растений и содержание в них эндогенных БС проводили на культуре тритикале (*Triticosecale Wittmack*) сорта Гелио. Семена получены из Республиканского научно-производственного центра по земледелию НАН Беларуси (г. Жодино), урожай 2024 г. (семена высушены на зерносушильной машине при температуре 43–45 °С, очищены и отсортированы, всхожесть 98 %). Посев семян осуществляли в увлажненный (60 % от полной влагоемкости) почвенный субстрат «Биогумус» (Вона Agro, Беларусь) с pH 5,5–5,8. Вес почвы в сосуде 0,5 кг, диаметр сосуда — 13 см, высота — 10 см. Количество семян, используемых для опыта, — 25 шт./сосуд. Растения тритикале выращивались в условиях регулируемой светокультуры при температуре 22 ± 2 °С, освещенности 12 000–15 000 лк и влажности воздуха 60–70 %, с фотопериодом 16 ч света / 8 ч темноты. Полив осуществляли ежедневно, равномерным увлажнением субстрата водой комнатной температуры, с визуальным контролем влажности верхнего слоя почвы. После появления всходов на стадии первого листа (через 5 сут после посева) проводили обработку растений растворами органических кислот в концентрации 10^{-7} и 10^{-9} М (выбраны как оптимальные в ходе предшествующих экспериментов) из расчета 2,5 мл/сосуд. Отбор растительных проб для оценки биометрических показателей роста растений проводили на стадии 2 (7 сут после опрыскивания) и 3 листа (14 сут после опрыскивания). Биометрические показатели растений (высоту и сырую массу) измеряли вручную с использованием линейки и аналитических весов, согласно стандартной методике [4]. Опыт закладывали в 3-кратной повторности.

Для количественной оценки эндогенного содержания БС методом ИФА растительные образцы (надземную часть) отбирали на 7 и 14 сут после опрыскивания. Образцы фиксировали при -70 °С и лиофильно высушивали под вакуумом на приборе VirTis 6211 “LabX” (США). Лиофилизированные образцы гомогенизировали в буферном растворе (0,05 М Трис, pH 7,4, содержащий (%): 0,9 NaCl, 0,1 БСА, 0,02 Твин™20) с помощью диспергатора IKA T 18 digital ULTRA-TURRAX®

(IKA-Werke, Германия). Для более глубокой экстракции гомогенаты выдерживали в течение 24 ч при -20 °С, затем образцы центрифугировали на приборе Eppendorf® MiniSpin Plus (Eppendorf, Германия), полученный супернатант анализировали. Количественную оценку БС проводили методом двухстадийного иммуноферментного анализа [30] с использованием разработанных нами ранее и производимых в Институте биоорганической химии НАН Беларуси иммуноферментных тест-систем (ТУ ВУ 100185129.178-2020) для следующих групп БС: 24R-метилбрасиностероиды (24R-метилБС), включающие 24-эпibrassinоида, 24-эпикастастерон и 6-дезоксо-24-эпикастастерон; 24S-метилбрасиностероиды (24S-метилБС), включающие brassinоида, кастастерон и 6-дезоксокастастерон; группы 24S-этилбрасиностероиды (24S-этилБС), включающие 28-гомобрassinоида, 28-гомочкастастерон и 6-дезоксо-28-гомочкастастерон; В-лактон-, В-кетон- и 6-дезоксо-БС.

Калибровочные пробы готовили методом серийных разведений исходного спиртового раствора с известной концентрацией (10^{-4} М) брасиностероида буферным раствором (0,05 М Трис, pH 7,4, содержащий (%): NaCl — 0,9, БСА — 0,1, Твин™20 — 0,02). Раствор ферментативного конъюгата брасиностероида с пероксидазой хрена готовили на этом же буферном растворе. В лунки полистирольного планшета с иммобилизованными антителами вносили по 150 мкл калибровочных проб и анализируемых образцов в дубликатах. Концентрация стероида в калибровочных пробах составляла 0; 0,01, 0,05, 0,1; 0,5, 1,0 и 5,0 нмоль/л. Планшет инкубировали при 37 °С в течение 2 ч, после чего содержимое лунок удаляли и лунки промывали промывочным раствором (4×150 мкл). Затем во все промытые лунки добавляли по 150 мкл раствора конъюгата соответствующего брасиностероида с пероксидазой хрена и инкубировали 5 мин при 37 °С. Затем удаляли содержимое, промывали, как описано выше, добавляли по 150 мкл хромоген-субстратной смеси и инкубировали при 37 °С в течение 20 мин. Реакцию останавливали добавлением во все лунки по 50 мкл раствора стоп-реагента (5%-ного раствора H_2SO_4). Оптическую плотность (ОП) раствора во всех лунках измеряли на универсальном фотометре Ф300ТП («Витязь», Беларусь) при длине волны 450 нм. Для каждой калибровочной пробы рассчитывали средние арифметические значения ОП, строили график зависимости показателя $V/V_0 \cdot 100\%$ от концентрации брасиностероида в калибровочных пробах (нмоль/л), где V и V_0 — значения оптической плотности продукта ферментативной реакции в присутствии и в отсутствие свободного брасиностероида соответственно. Методом интерполяции по калибровочному графику рассчитывали концентрацию

БС (нмоль/л) в анализируемой пробе. Сигмоидальные калибровочные кривые линеаризовали с помощью преобразования *log-logit*: $\text{logit } B/B_0 = \ln((B/B_0)/(100-B/B_0))$. Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью программы Microsoft Office Excel 2010.

Эксперименты повторяли независимо трижды при трехкратной повторности в каждой серии. Результаты представлены средними значениями и их стандартными отклонениями. Достоверность различий рассчитывали по *t*-критерию Стьюдента. Обсуждаются различия, достоверные при $P \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование образцов проростков растений тритикале, проведенное методом иммуноферментного анализа [30], показало, что через 7 сут после обработки содержание БС ряда 24-эпибрассинолида уменьшилось по отношению к контролю (рис. 1 а). Сильнее всего это уменьшение было в случае применения феруловой кислоты (независимо от концентрации) и галловой кислоты в концентрации 10^{-7} М. Через 14 сут только обработка феруловой кислотой приводила к уменьшению содержания БС этой группы, при этом чем ниже была концентрация кислоты, тем значительнее уменьшение.

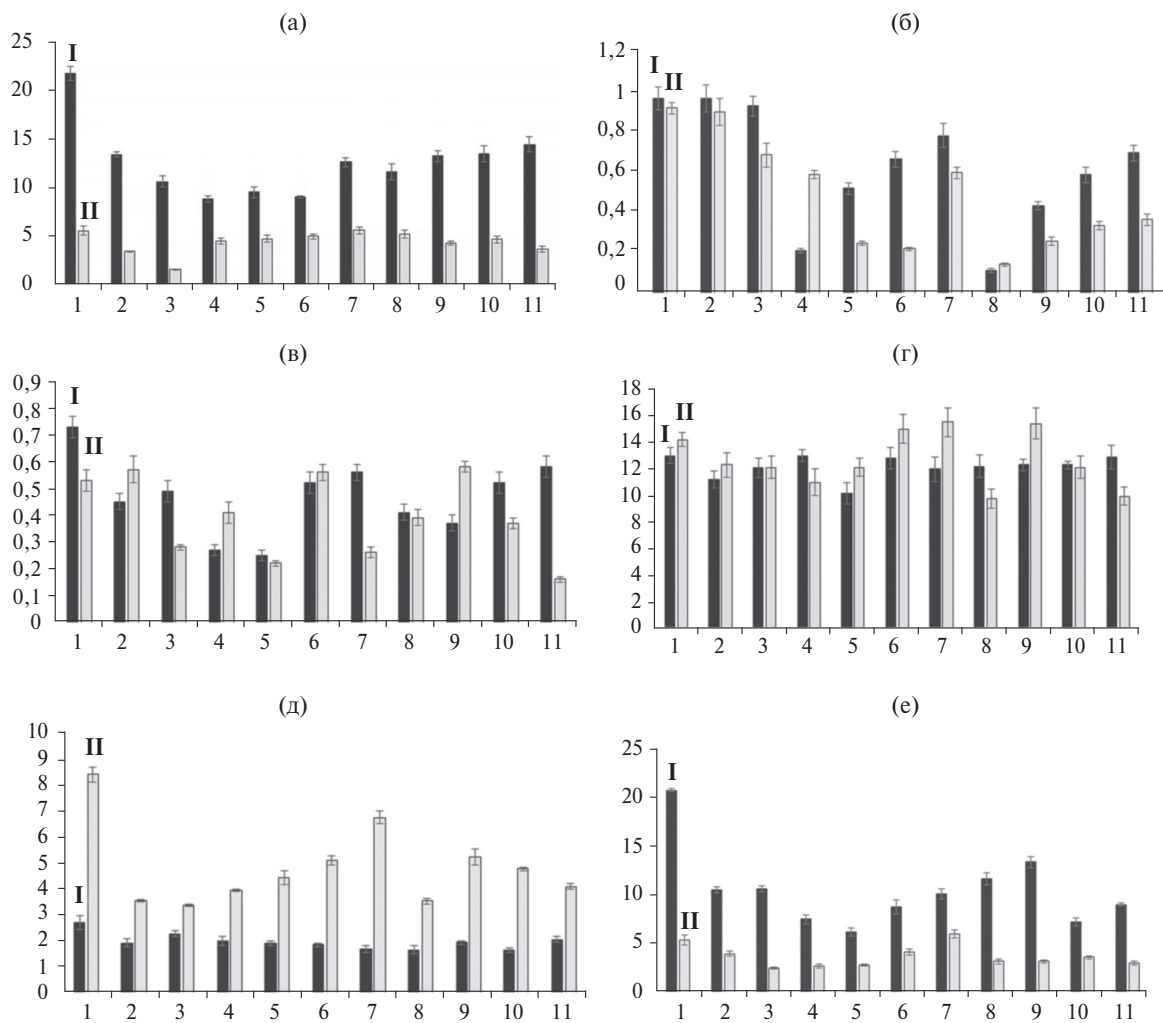


Рис. 1. Содержание брассиностероидов (нг/г лиофилизированной биомассы) ряда 24-эпибрассинолида (а, 24R-метилБС), ряда брассинолида (б, 24S-метилБС), ряда 28-гомобрассинолида (в, 24S-этилБС), В-дезоксобрассиностероидов (г), В-кетобрассиностероидов (д), В-лактонбрассиностероидов (е) после обработки фенолкарбонными кислотами в течение 7 (I) и 14 сут (II): 1 — контроль, вода, 2, 3 — феруловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно, 4, 5 — *p*-кумаровая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно, 6, 7 — галловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно, 8, 9 — салициловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно, 10, 11 — ацетилсалициловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно

Fig. 1. Content of brassinosteroids (ng/g lyophilized biomass) of the 24-epibrassinolide series (a, 24R-methylBS), brassinolide series (б, 24S-methylBS), 28-homobrassinolide series (в, 24S-ethylBS), B-deoxobrassinosteroids (г), B-ketobrassinosteroids (д), B-lactone brassinosteroids (е) after treatment with phenolic acids for (I) 7 and (II) 14 days: 1, control, water; 2, 3, ferulic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively; 4, 5, *p*-coumaric acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively; 6, 7, gallic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively; 8, 9, salicylic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively; 10, 11, acetylsalicylic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively

Несколько иначе меняется содержание БС ряда brassinоида (рис. 1 б). На 7 сут после опрыскивания раствором феруловой кислоты изменений в содержании этих БС не происходило, сильно уменьшалось их количество при обработке *n*-кумаровой и салициловой кислотами в концентрации 10^{-7} М. Через 14 сут после обработки уменьшение содержания БС этой группы становилось еще более значительным — при обработке *n*-кумаровой (в концентрации 10^{-9} М), галловой (10^{-7} М) или салициловой (10^{-9} М) кислотами достигало 80–85 %.

Содержание БС ряда 28-гомобрасинолида (рис. 1 в) через 7 сут после обработки фенолкарбоновыми кислотами резко падало по сравнению с контролем только в случае *n*-кумаровой кислоты в обеих концентрациях. Через 14 сут значительное уменьшение содержания БС этой группы характерно для обработки феруловой, *n*-кумаровой, галловой и ацетилсалициловой кислотами в концентрации 10^{-9} М. При этом для обработки феруловой, галловой в концентрации 10^{-7} М и салициловой в концентрации 10^{-9} М характерно незначительное увеличение содержания 28-гомобрасиностероидов.

В настоящее время рассматривается два пути образования брасиностероидных лактонов — последних в цепи биосинтеза БС [28, 13]. На основе химического анализа эндогенных БС было обнаружено, что 6-дезоксоБС (поздний путь окисления С-6) преобладали над 6-оксоБС (ранний путь окисления С-6) в большинстве растений. В этой связи было интересно исследовать, как меняется содержание 6-дезоксо-, 6-кето- и 6-кето-7-оксабрасиностероидов в растениях тритикале в контроле и под действием фенолкарбоновых кислот.

Оказалось, что содержание 6-дезоксоБС на 7 и 14 сут после обработки в контрольных образцах больше, чем В-кетоБС (рис. 1 г и д). Особенно отчетливо это проявлялось на первой стадии развития (7 сут) — здесь отмечено 4-кратное преобладание 6-дезоксопроизводных. Следует отметить, что обработка фенолкарбоновыми кислотами не изменяла зависимость. Исключение составляла обработка галловой кислотой в обеих концентрациях и салициловой кислотой в концентрации 10^{-9} М через 14 сут после обработки, когда преобладание 6-дезоксоБС становилось менее значительным.

В пользу преобладания позднего пути окисления по С-6 в растениях тритикале говорит и тот факт, что профиль эндогенного уровня В-лактонбрасиностероидов (рис. 1 е) зеркально противоположен таковому для В-кетобрасиностероидов. Отмечено, что в контроле и при обработке фенолкарбоновыми кислотами содержание первых выше на 7-е сут после обработки по сравнению с 14-ми сут.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о влиянии фенолкарбоновых кислот на биосинтез стероидных фитогормонов. Брасиностероидный профиль зависит от структуры

применяемой кислоты и ее концентрации. По влиянию на уровень 24-эпибрасиностероидов наиболее «активно» себя ведет феруловая кислота, *n*-кумаровая и салициловая кислоты по влиянию на содержание БС группы brassinоида, *n*-кумаровая и ацетилсалициловая (в концентрации 10^{-9} М) кислоты по влиянию на уровень 28-гомобрасиностероидов. При этом кислотность растворов исследуемых нами кислот практически не оказывала влияния на характер изменения содержания эндогенных БС — все применяемые растворы имели рН = 4,4–4,7, близкий к рН дистиллированной воды (5,0). Исключение составляла *n*-кумаровая кислота (рН = 1,8–2,2 для концентраций 10^{-7} и 10^{-9} М), действие которой на баланс стероидных гормонов мало отличалось (или совсем не отличалось) от других изученных кислот.

Анализируя предыдущие работы по определению содержания БС в растениях, можно отметить некоторую аналогию в действии фенолкарбоновых кислот и стрессоров различной природы. Так, оценка стероид-гормонального статуса растений ячменя в норме и подвергнутых биотическому стрессу показала, что уровень эндогенных брасиностероидных гормонов понижался в условиях инфицирования грибом *Helminthosporium teres* Sacc. [26]. В опытах с микроклонами картофеля установлено, что содержание и баланс эндогенных БС определяется органоспецифичностью и скороспелостью сорта [20]. При этом показано, что с возрастом у растений снижалось содержание В-лактонов и увеличивалось содержание В-кетонов. Обнаружено, что растения ячменя реагировали на полиметаллический стресс изменением эндогенного содержания различных групп фитостероидов (24S-метилБС, 24R-метилБС, 28-гомоБС, В-лактонБС и В-кетоБС). При этом стресс-зависимая динамика изменения эндогенного содержания различных групп БС характеризовалась органоспецифичностью и определялась возрастным состоянием растений, интенсивностью действующего стрессора и спецификой брасиностероидов [18]. Показано, что на солевой стресс растения картофеля отвечали изменением профиля эндогенных брасиностероидов. При этом идентифицирована группа 6-кетоБС, содержание которых, в отличие от других анализируемых групп гормонов, значительно возрастало при засолении [22]. Отмечена разная реакция зеленых микроводорослей на различные виды стресса. Так, при солевом стрессоре наблюдалось увеличение содержания БС (в основном, кастастерона). Снижение температуры незначительно повлияло на содержание БС [33]. Растения ячменя реагировали на засуху не только ингибированием роста, ухудшением водного статуса, усилением перекисного окисления липидов, дифференциальным воздействием на антиоксидантные ферменты, интенсивным накоплением пролина, изменением экспрессии генов, участвующих в метаболизме,

но и снижением эндогенного содержания стероидных фитогормонов (28-гомоБС, В-кетоны и В-лактоны) [23]. Показана различная реакция китайской, белокочанной и листовой капусты на воздействие засухи. Наибольшая засухоустойчивость листовой капусты коррелировала с повышением уровня ряда фитогормонов, в том числе brassinosterоида тифастерина, чувствительность к засухе китайской капусты коррелировала со значительным повышением уровня brassinоида [29]. Содержание эндогенных БС было оценено у двух генотипов кукурузы, которые различались по своей чувствительности к засухе. Засухоустойчивый генотип характеризовался значительно более высоким содержанием общих эндогенных БС (особенно тифастерола и 28-норbrassinоида), а чувствительный к засухе генотип показал более высокие уровни 28-норкастастерона. Оба генотипа также различались по снижению/повышению уровня 28-норbrassinоида, 28-норкастастерона, 28-гомокастастерона и 28-гомодолихостерона под действием засухи [34]. Исследовано содержание БС в листьях молодых растений кукурузы, подвергшихся очень слабому дефициту воды (70 % полевой влагоемкости почвы) и более выраженному дефициту воды (30 % полевой влагоемкости почвы). Оказалось, что уровни эндогенных БС меняются со временем, при этом различные типы БС ведут себя по-разному. Уже в самом начале дефицита воды растения усиливают биосинтез БС, используя различные пути (содержание 6-дезоксо- БС группы С28 увеличилось на 20–80 % по сравнению с контролем, содержание представителя группы С27 увеличилось на 70 %, а содержание некоторых БС группы С29 увеличилось на 40 %) [27].

Многие функции фенольных соединений в растениях хорошо известны — они участвуют в процессах фотосинтеза, дыхания, роста, в формировании защитных механизмов при адаптации [2]. Есть данные о положительном влиянии полифенольных соединений на рост и развитие растений, в частности, озимой пшеницы [5]. В то же время показано, что ряд фенолкарбонных кислот (салициловая, коричная, *o*-кумаровая, *n*-гидроксibenзойная и *m*-метоксibenзойная) в концентрациях 10^{-3} - 10^{-5} М либо не оказывали влияния на прорастание семян и рост проростков тритикале, либо ингибировали начальный рост растений [7]. При этом наблюдалась зависимость указанных параметров от сорта тритикале. Проведенные нами исследования на растениях тритикале сорта Гелио с использованием феруловой, *n*-кумаровой, галловой, салициловой и ацетилсалициловой кислот в концентрациях 10^{-7} и 10^{-9} М показали, что через 14 сут после обработки все изученные кислоты приводят к увеличению роста (на 6–10 %) и значительному увеличению сырой массы по сравнению с контролем (рис. 2 а и б). Наиболее активной в обеих концентрациях ока-

залась феруловая (увеличение массы на 38–47 %) и ацетилсалициловая кислота (40–43 %).

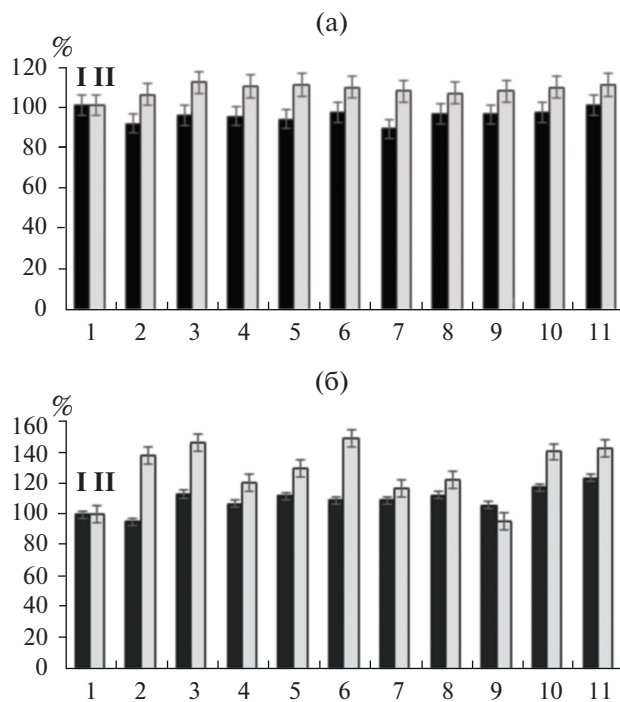


Рис. 2. Влияние фенолкарбонных кислот на биометрические показатели роста и развития тритикале — высоту (а) и сырую массу (б) наземной части растений на 7 (I) и 14 (II) сут после обработки фенолкарбонными кислотами: 1 — контроль, вода, 2, 3 — феруловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М, 4, 5 — *p*-кумаровая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно, 6, 7 — галловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно, 8, 9 — салициловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно, 10, 11 — ацетилсалициловая кислота, 10^{-7} , 10^{-9} М соответственно

Fig. 2. The influence of phenolcarboxylic acids on biometric indicators of growth and development of triticale (a) height and (b) raw mass of the above-ground parts of plants by (I) 7 and (II) 14 days after treatment with phenolic acids: 1, control, water; 2, 3, ferulic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M; 4, 5, *p*-coumaric acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively; 6, 7, gallic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively; 8, 9, salicylic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively; 10, 11, acetylsalicylic acid, 10^{-7} , 10^{-9} M, respectively

Обращает на себя внимание тот факт, что при общем уменьшении содержания на единицу веса brassinosterоидов практически всех групп наблюдалось прибавление как в росте, так и в весе растений тритикале по отношению к контролю. Следует отметить, что аналогичная картина (уменьшение содержания БС на начальной стадии развития при увеличении длины побегов и сырой массы) наблюдалась нами при проведении опытов с феруловой кислотой в концентрации 10^{-7} и 10^{-9} М на растениях яровой пшеницы [25], при этом в полевом опыте прибавка урожайности составила 13 %.

Таким образом, впервые изучено влияние экзогенных фенолкарбоновых кислот (феруловой, галловой, салициловой, ацетилсалициловой и *n*-кумаровой) на содержание БС (группы брассинолида, 24-эпибрассинолида, 28-гомобрассинолида, В-лактон-, В-кетон- и В-дезоксопроизводных) на ранних стадиях развития растений тритикале в лабораторных условиях. Установлено, что содержание БС на единицу веса менялось в сторону уменьшения (исключение составляют б-дезоксобрассиностероиды в некоторых вариантах) и зависит от структуры применяемой кислоты и ее концентрации. Показано, что через 14 сут после обработки все изученные кислоты приводят к

увеличению роста (на 6–10 %) и значительному увеличению сырого веса надземной части растения по сравнению с контролем. Наиболее активными в концентрациях 10^{-7} и 10^{-9} М оказались феруловая и ацетилсалициловая кислота, а также галловая кислота в концентрации 10^{-7} М. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии фенолкарбоновых кислот на биосинтез БС, повышая таким образом рост и развитие растений тритикале. Изменения, обусловленные регуляторным действием фенолкарбоновых кислот, могут иметь прямое значение для оценки адаптационного потенциала растений и последующей биорегуляторной коррекции в агротехнологиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аутко А.А., Рупасова Ж.А., Василевская Т.И., Аутко Ан.Ф., Позняк О.В. Влияние фиторегуляторов Эпина и Эколиста на биохимический состав сырья корня валерианы лекарственной. *Вестн НАН Беларуси. Серия биол. наук.* 2009. № 1. С. 30–35.
2. Вольнец А.П. Фенольные соединения в жизнедеятельности растений. *Беларуская навука.* Минск. 2013. 283 с.
3. Грабовец А.И., Крохмаль А.В. Тритикале: монография. ООО «Издательство «Юг». Ростов-на-Дону. 2019. 440 с.
4. Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М., Наука: 1984. 424 с.
5. Коношина С.Н., Прудникова Е.Г. Влияние полифенольных соединений на рост и развитие растений озимой пшеницы. *Вестник ОрелГАУ.* 2015. Т. 5. № 56. С. 61–67. <https://doi.org/10.15217/issn1990-3618.2015.5.60>
6. Манжелесова Н.Е. Содержание фенольных соединений и активность пероксидазы при индуцированной брассиностероидами устойчивости ячменя к сетчатой пятнистости. *Вестн НАН Беларуси. Серия биол. наук.* 1997. № 3. С. 20–24.
7. Пшеничная Л.А., Шуканов В.П., Вольнец А.П., Гриб С.И. Действие физиологически активных веществ на устойчивость к предуборочному прорастанию зерновок тритикале (*Triticosecale wittmack*). *Вестн НАН Беларуси. Серия биол. наук.* 2009. № 3. С. 10–13.
8. Asci Ö.A., Devci H., Erdeger A. et al. Brassinosteroids Promote Growth and Secondary Metabolite Production in Lavandin (*Lavandula intermedia* Emeric ex Loisel.). *J. of Essent. Oil Bear. Plants.* 2019. V. 22. Pp. 254–263. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1585298>
9. Asghari M., Rezaei-Rad R. 24-Epibrassinolide enhanced the quality parameters and phytochemical contents of table grape. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 2018. V. 91. Pp. 226–231. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.030>
10. Ayub R.A., Reis L., Lopes P.Z., Bosetto L. Ethylene and brassinosteroid effect on strawberry ripening after field spray. *Rev. Bras. Frutic.* 2018. V. 40. e-544. <https://doi.org/10.1590/0100-29452018544>
11. Babalik Z. Increasing of Phenolic Compounds by Brassinosteroid Applications in Immobilized Cell Suspension Cultures of *Vitis vinifera* L. cv. Cinsault. *J. Agr. Sci.* 2021. V. 27. Pp. 298–303. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.674860>
12. Babalik Z., Demirci T., Aşçı Ö.A. Brassinosteroids Modify Yield, Quality, and Antioxidant Components in Grapes (*Vitis vinifera* cv. Alphonse Lavallée). *J. Plant Growth Regul.* 2020. V. 39. Pp. 147–156. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09970-5>
13. Bajguz A., Chmur M., Gruszka D. Comprehensive Overview of the Brassinosteroid Biosynthesis Pathways: Substrates, Products, Inhibitors, and Connections. *Front. Plant Sci.* 2020. V. 11. Pp. 1034. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01034>
14. Bajguz A., Hayat S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant Physiol. Biochem.* 2009. V. 47. № 1. Pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002>
15. Bajguz A., Tretyn A. The chemical characteristic and distribution of brassinosteroids in plants. *Phytochem.* 2003. V. 62. № 7. P. 1027–1046. [https://doi.org/10.1016/s0031-9422\(02\)00656-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9422(02)00656-8)
16. Baliuk N.V., Laman N.A., Kalatskaja J.N. Physiological and biochemical features of implementation of the adaptive potential of clonally micropropagated potato plants using immunostimulants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series.* 2024. V. 69. № 1. Pp. 15–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-1-15-24>

17. Bartwell A., Mall R., Lohani P., Guru S.K., Arora S. Role of Secondary Metabolites and Brassinosteroids in Plant Defense Against Environmental Stresses. *J. Plant Growth Regul.* 2013. V. 32. Pp. 216–232. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9272-x>
18. Danilova E.D., Litvinovskaya R.P., Zlobin I.E. et al. Polymetallic Stress Changes the Endogenous Status of Brassinosteroids and Reduces the Effectiveness of Photochemical Reactions Photosystem II in Barley Plants. *Dokl. Biochem. Biophys.* 2022. V. 504. Pp. 123–127. <https://doi.org/10.1134/S1607672922030024>
19. Dröge W. Free Radicals in the Physiological Control of Cell Function. *Physiol. Rev.* 2002. V. 82. № 1. Pp. 47–95. <https://doi.org/10.1152/physrev.00018.2001>
20. Efimova M.V., Litvinovskaya R.P., Medvedeva Yu.V. et al. The Endogenous Brassinosteroid Content and Balance in Potato Microclones Is Determined by Organ Specificity and the Variety Ripening Term. *Dokl. Biol. Sci.* 2019. V. 485. Pp. 33–36. <https://doi.org/10.1134/S0012496619020017>
21. El-Mashad A.A.A., Mohamed H.I. Brassinolide alleviates salt stress and increases antioxidant activity of cowpea plants (*Vigna sinensis*). *Protoplasma.* 2012. V. 249. Pp. 625–635. <https://doi.org/10.1007/s00709-011-0300-7>
22. Kolomeichuk L.V., Danilova E.D., Murgan O.K. et al. Endogenous brassinosteroids are involved in the formation of salt resistance of plants. *Dokl. Biol. Sci.* 2023. V. 511. № 1. Pp. 259–263. <https://doi.org/10.31857/S2686738923600164>
23. Kolomeichuk L.V., Murgan O.K., Danilova E.D. et al. Effects of Lactone- and Ketone-Brassinosteroids of the 28-Homobrassinolide Series on Barley Plants under Water Deficit. *Plants.* 2024. V. 13. Pp. 1345. <https://doi.org/10.3390/plants13101345>
24. Lin C.M., Chen C.T., Lee H.H., Lin J.K. Prevention of Cellular ROS Damage by Isovitexin and Related Flavonoids. *Planta Med.* 2002. V. 68. № 4. Pp. 365–367. <https://doi.org/10.1055/s-2002-26753>
25. Litvinovskaya R.P., Manzheslava N.E., Sauchuk A.L. et al. Growth-Regulating Activity of Brassinosteroid Compositions with Ferulic Acid on Spring Wheat Plants. *Appl. Biochem. Microbiol.* 2025. V. 61. Pp. 172–184. <https://doi.org/10.31857/S0555109925020076>
26. Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L., Manzheslava N.E., Polyanskaya S.N., Khripach V.A. Immunoenzyme test systems for evaluating the steroid hormone status of plants under biotic stress. *Russ. Chem. Bull.* 2014. V. 63. Pp. 2184–2188. <https://doi.org/10.1007/s11172-014-0717-1>
27. Marková H., Tarkowská D., Čečetka P. et al. Water Shortage-Caused Changes in Endogenous Brassinosteroid Contents in Maize Leaves Depend on the Brassinosteroid Type and Occur Already at the Beginning of the Stress Period. *J. Plant Growth Regul.* 2023. V. 14. Pp. 1139162. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11821-5>
28. Ohnishi T. Recent advances in brassinosteroid biosynthetic pathway: insight into novel brassinosteroid shortcut pathway. *J. Pest. Sci.* 2018. V. 43. Pp. 159–167. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D18-040>
29. Pavlović I., Petřík I., Tarkowska D. et al. Correlations between Phytohormones and Drought Tolerance in Selected Brassica Crops: Chinese Cabbage, White Cabbage and Kale. *Int. J. Mol. Sci.* 2018. 19. Pp. 2866. <https://doi.org/10.3390/ijms19102866>
30. Pradko A.G., Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L. et al. A new ELISA for quantification of brassinosteroids in plants. *Steroids.* 2015. V. 97. Pp. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2014.08.022>
31. Rogozhin V.V., Verkhoturov V.V., Kurilyuk T.T. The Antioxidant System of Wheat Seeds during Germination. *Biology Bulletin.* 2001. V. 28. Pp. 126–133. <https://doi.org/10.1023/A:1009454713659>
32. Serna M., Hernández F., Coll F., Coll Y., Amorós A. Effects of brassinosteroid analogues on total phenols, antioxidant activity, sugars, organic acids and yield of field grown endive (*Cichorium endivia* L.). *J. Sci. Food Agric.* 2013. V. 93. Pp. 1765–1771. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5968>
33. Stirk W.A., P Bálint P., Tarkowská D. et al. Endogenous brassinosteroids in microalgae exposed to salt and low temperature stress. *Eur. J. Phycology.* 2018. V. 53. Pp. 273–279. <https://doi.org/10.1080/09670262.2018.1441447>
34. Tůmova L., Tarkowska D., Řehořova K. et al. Drought-tolerant and drought-sensitive genotypes of maize (*Zea mays* L.) differ in contents of endogenous brassinosteroids and their drought-induced changes. *PLoS One.* 2018. V. 13. P. 0197870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197870>
35. Volkova L.A., Urmantseva V.V., Burgutin A.B. Stress-protective effect of phenylpropanoid complex on potato plants in vitro. *Russ. J. Plant Physiol.* 2014. V. 61. Pp. 255–261. <https://doi.org/10.1134/S1021443714010166>
36. Volynets A.P., Pshenichnaya L.A., Khripach V.A. The nature of protective action of 24-epibrassinolide on barley plants. *Proc. Plant Growth Regul. Soc. Am.* 1997. V. 24. Pp. 133–137.
37. Waisi H., Kosović A., Krstić Đ. et al. Polyphenolic Profile of Maize Seedlings Treated with 24-Epibrassinolide. *J. Chem.* 2015. № 1. P. 976971. <https://doi.org/10.1155/2015/976971>
38. Zhao H.J., Zou Q. Protective Effects of Exogenous Antioxidants and Phenolic Compounds on Photosynthesis of Wheat Leaves under High Irradiance and Oxidative Stress. *Photosynthetica.* 2002. V. 40. № 4. Pp. 523–527. <https://doi.org/10.1023/A:1024339716382>

REFERENCES

1. Autko A.A., Rupasova Zh.A., Vasilevskaya T.I., Autko An.F., Poznyak O.V. The influence of phyto regulators Epin and Ecolist on the biochemical composition of the raw material of the root of valerian officinalis. *Vesti NAN Belarusi, Ser. Biol. Nauk.* 2009, no. 1, pp. 30–35. (In Russ.)
2. Volynets A.P. Phenolic compounds in plant life. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2013, 283 p. (In Russ.)
3. Grabovets A.I., Krokhal' A.V., Triticale: Monograph, Rostov-on-Don: OOO Izd. Yug, 2019, 440 p. (In Russ.)
4. Zaitsev G.N. Mathematical Statistics in Experimental Botany, Moscow: Nauka, 1984, 424 p. (In Russ.)
5. Konoshina S.N., Prudnikova E.G. The influence of polyphenolic compounds on the growth and development of winter wheat plants. *Vestn. Orel-GAU*, 2015, vol. 5, no. 56, pp. 61–67. <https://doi.org/10.15217/issn1990-3618.2015.5.60>. (In Russ.)
6. Manzhelesova N.E. Phenolic compound content and peroxidase activity in brassinosteroid-induced barley resistance to net blotch. *Vesti NAN Belarusi, Ser. Biol. Nauk.* 1997, no. 3, pp. 19–24. (In Russ.)
7. Pshenichnaya L.A., Shukanov V.P., Volynets A.P., Grib S.I. The effect of physiologically active substances on the resistance of triticale (*Triticosecale wittmack*) grains to pre-harvest germination. *Vesti NAN Belarusi, Ser. Biol. Nauk.* 2009, no. 3, pp. 10–13. (In Russ.)
8. Asci Ö.A., Deveci H., Erdeger A. et al. Brassinosteroids Promote Growth and Secondary Metabolite Production in Lavandin (*Lavandula intermedia* Emeric ex Loisel.). *J. of Essent. Oil Bear. Plants.* 2019, vol. 22, pp. 254–263. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1585298>
9. Asghari M., Rezaei-Rad R. 24-Epibrassinolide enhanced the quality parameters and phytochemical contents of table grape. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 2018, vol. 91, pp. 226–231. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.030>
10. Ayub R.A., Reis L., Lopes P.Z., Bosetto L. Ethylene and brassinosteroid effect on strawberry ripening after field spray. *Rev. Bras. Frutic.* 2018, vol. 40, e-544. <https://doi.org/10.1590/0100-29452018544>
11. Babalik Z. Increasing of Phenolic Compounds by Brassinosteroid Applications in Immobilized Cell Suspension Cultures of *Vitis vinifera* L. cv. Cinsault. *J. Agr. Sci.* 2021, vol. 27, pp. 298–303. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.674860>
12. Babalik Z., Demirci T., Aşçı Ö.A. Brassinosteroids Modify Yield, Quality, and Antioxidant Components in Grapes (*Vitis vinifera* cv. Alphonse Lavallée). *J. Plant Growth Regul.* 2020, vol. 39, pp. 147–156. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09970-5>
13. Bajguz A., Chmur M., Gruszka D. Comprehensive Overview of the Brassinosteroid Biosynthesis Pathways: Substrates, Products, Inhibitors, and Connections. *Front. Plant Sci.* 2020, vol. 11, p. 1034. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01034>
14. Bajguz A., Hayat S. Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant Physiol. Biochem.*, 2009, vol. 47, no. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002>
15. Bajguz A., Tretyn A. The chemical characteristic and distribution of brassinosteroids in plants. *Phytochem.*, 2003, vol. 62, no. 7, pp. 1027–1046. [https://doi.org/10.1016/s0031-9422\(02\)00656-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9422(02)00656-8)
16. Baliuk N.V., Laman N.A., Kalatskaja J.N. Physiological and biochemical features of implementation of the adaptive potential of clonally micropropagated potato plants using immunostimulants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 15–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-1-15-24>
17. Bartwell A., Mall R., Lohani P., Guru S.K., Arora S. Role of Secondary Metabolites and Brassinosteroids in Plant Defense Against Environmental Stresses. *J. Plant Growth Regul.* 2013, vol. 32, pp. 216–232. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9272-x>
18. Danilova E.D., Litvinovskaya R.P., Zlobin I.E. et al. Polymetallic Stress Changes the Endogenous Status of Brassinosteroids and Reduces the Effectiveness of Photochemical Reactions Photosystem II in Barley Plants. *Dokl. Biochem. Biophys.* 2022, vol. 504, pp. 123–127. <https://doi.org/10.1134/S1607672922030024>
19. Dröge W. Free Radicals in the Physiological Control of Cell Function. *Physiol. Rev.*, 2002, vol. 82, no. 1, pp. 47–95. <https://doi.org/10.1152/physrev.00018.2001>
20. Efimova M.V., Litvinovskaya R.P., Medvedeva Yu.V. et al. The Endogenous Brassinosteroid Content and Balance in Potato Microclones Is Determined by Organ Specificity and the Variety Ripening Term. *Dokl. Biol. Sci.* 2019, vol. 485, pp. 33–36. <https://doi.org/10.1134/S0012496619020017>
21. El-Mashad A.A.A., Mohamed H.I. Brassinolide alleviates salt stress and increases antioxidant activity of cowpea plants (*Vigna sinensis*). *Protoplasma.* 2012, vol. 249, pp. 625–635. <https://doi.org/10.1007/s00709-011-0300-7>
22. Kolomeichuk L.V., Danilova E.D., Murgan O.K. et al. Endogenous brassinosteroids are involved in the formation of salt resistance of plants. *Dokl. Biol. Sci.*, 2023, vol. 511, no. 1, pp. 259–263. <https://doi.org/10.31857/S2686738923600164>

23. Kolomeichuk L.V., Murgan O.K., Danilova E.D. et al. Effects of Lactone- and Ketone-Brassinosteroids of the 28-Homobrassinolide Series on Barley Plants under Water Deficit. *Plants*. 2024, vol. 13, p. 1345. <https://doi.org/10.3390/plants13101345>
24. Lin C.M., Chen C.T., Lee H.H., Lin J.K. Prevention of Cellular ROS Damage by Isovitexin and Related Flavonoids. *Planta Med*, 2002, vol. 68, no. 4, pp. 365–367. <https://doi.org/10.1055/s-2002-26753>
25. Litvinovskaya R.P., Manzhalesava N.E., Sauchuk A.L. et al. Growth-Regulating Activity of Brassinosteroid Compositions with Ferulic Acid on Spring Wheat Plants. *Appl. Biochem. Microbiol.* 2025, vol. 61, pp. 172–184. <https://doi.org/10.31857/S0555109925020076>
26. Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L., Manzhelesova N.E., Polyanskaya S.N., Khripach V.A. Immunoenzyme test systems for evaluating the steroid hormone status of plants under biotic stress. *Russ. Chem. Bull.* 2014, vol. 63, pp. 2184–2188. <https://doi.org/10.1007/s11172-014-0717-1>
27. Marková H., Tarkowská D., Čečetka P. et al. Water Shortage-Caused Changes in Endogenous Brassinosteroid Contents in Maize Leaves Depend on the Brassinosteroid Type and Occur Already at the Beginning of the Stress Period. *J. Plant Growth Regul.* 2023, vol. 14, p. 1139162. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11821-5>
28. Ohnishi T. Recent advances in brassinosteroid biosynthetic pathway: insight into novel brassinosteroid shortcut pathway. *J. Pest. Scien.* 2018, vol. 43, pp. 159–167. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D18-040>
29. Pavlović I., Petřík I., Tarkowska D. et al. Correlations between Phytohormones and Drought Tolerance in Selected Brassica Crops: Chinese Cabbage, White Cabbage and Kale. *Int. J. Mol. Sci.* 2018, vol. 19, p. 2866. <https://doi.org/10.3390/ijms19102866>
30. Pradko A.G., Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L. et al. A new ELISA for quantification of brassinosteroids in plants. *Steroids*. 2015, vol. 97, pp. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2014.08.022>
31. Rogozhin V.V., Verkhoturov V.V., Kurilyuk T.T. The Antioxidant System of Wheat Seeds during Germination. *Biology Bulletin*. 2001, vol. 28, pp. 126–133. <https://doi.org/10.1023/A:1009454713659>
32. Serna M., Hernández F., Coll F., Coll Y., Amorós A. Effects of brassinosteroid analogues on total phenols, antioxidant activity, sugars, organic acids and yield of field grown endive (*Cichorium endivia L.*). *J. Sci. Food Agric.* 2013, vol. 93, pp. 1765–1771. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5968>
33. Stirk W.A., Bálint P., Tarkowská D. et al. Endogenous brassinosteroids in microalgae exposed to salt and low temperature stress. *Eur. J. Phycology*. 2018, vol. 53, pp. 273–279. <https://doi.org/10.1080/09670262.2018.1441447>
34. Tůmova L., Tarkowska D., Řehořova K. et al. Drought-tolerant and drought-sensitive genotypes of maize (*Zea mays L.*) differ in contents of endogenous brassinosteroids and their drought-induced changes. *PLoS One*. 2018, vol. 13, p. 0197870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197870>
35. Volkova L.A., Urmantseva V.V., Burgutin A.B. Stress-protective effect of phenylpropanoid complex on potato plants in vitro. *Russ. J. Plant Physiol.* 2014, vol. 61, pp. 255–261. <https://doi.org/10.1134/S1021443714010166>
36. Volynets A.P., Pshenichnaya L.A., Khripach V.A. The nature of protective action of 24-epibrassinolide on barley plants. *Proc. Plant Growth Regul. Soc. Am.* 1997, vol. 24, pp. 133–137.
37. Waisi H., Kosović A., Krstić Đ. et al. Polyphenolic Profile of Maize Seedlings Treated with 24-Epibrassinolide. *J. Chem.* 2015, no. 1, p. 976971. <https://doi.org/10.1155/2015/976971>
38. Zhao H.J., Zou Q. Protective Effects of Exogenous Antioxidants and Phenolic Compounds on Photosynthesis of Wheat Leaves under High Irradiance and Oxidative Stress. *Photosynthetica*, 2002, vol. 40, no 4, pp. 523–527. <https://doi.org/10.1023/A:1024339716382>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Литвиновская Раиса Павловна — доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: litvin@iboch.by
<https://orcid.org/0000-0002-9657-0790>

Савчук Алина Леонидовна — кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: sauchuk@iboch.by
<https://orcid.org/0000-0003-1160-6895>

ABOUT THE AUTHORS

Litvinovskaya, Raisa P. — Dr. Sci. in Chemistry, Professor, Chief Researcher, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: litvin@iboch.by
<https://orcid.org/0000-0002-9657-0790>

Sauchuk, Alina L. — Dr. Sci. in Chemistry, Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: sauchuk@iboch.by
<https://orcid.org/0000-0003-1160-6895>

Денисюк Дарья Вадимовна — младший научный сотрудник, Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: daria.denisiuk@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7346-2079>

Картыжова Лилия Евгеньевна — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: lkartyzhova@iboch.by
<https://orcid.org/0009-0004-6678-882X>

Хрипач Владимир Александрович — доктор химических наук, профессор, академик НАН Беларуси, заведующий лабораторией химии стероидов, Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: khripach@iboch.by
<https://orcid.org/0000-0002-3850-9860>

Denisiuk, Daria V. — Junior Research Fellow, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: daria.denisiuk@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7346-2079>

Kartyzhova, Liliya E. — Dr. Sci. in Biology, Leading Researcher, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: lkartyzhova@iboch.by
<https://orcid.org/0009-0004-6678-882X>

Khripach, Vladimir A. — Dr. Sci. in Chemistry, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Head of the Laboratory of Steroid Chemistry, Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: khripach@iboch.by
<https://orcid.org/0000-0002-3850-9860>

Поступила в редакцию 09.07.2025

После доработки 04.08.2025

Принята к публикации 29.09.2025

Received July 09, 2025

Revised August 04, 2025

Accepted September 29, 2025