

УДК 581.1+577.175.19

РОСТОРЕГУЛИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ БРАССИНОСТЕРОИДОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИХ С ФЕРУЛОВОЙ КИСЛОТОЙ НА РАСТЕНИЯХ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

© 2025 г. Р. П. Литвиновская^{1,*}, Н. Е. Манжелесова¹, А. Л. Савчук¹,
Д. В. Денисюк¹, И. Г. Бруй², В. А. Хрипач¹

¹Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, 220084 Республика Беларусь

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по земледелию,
Жодино, Минская обл., 222160 Республика Беларусь

*e-mail: litvin@iboch.by

Поступила в редакцию 19.09.2024 г.

После доработки 20.10.2024 г.

Принята к публикации 10.11.2024 г.

Изучено влияние на ростовые, морфообразовательные, физиолого-биохимические процессы и зерновую продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) стероидных фитогормонов (24-эпибрасинолида и 24-эпикастастерона), феруловой кислоты и их смесей на всех этапах онтогенеза. Соединения и их смеси протестированы в лабораторных и полевых условиях. Изучена динамика изменения содержания стероидных фитогормонов на ранних этапах развития растений. Показано, что обработка растений путем опрыскивания брассиностероидами или феруловой кислотой приводила к активации процессов роста, продуктивности формообразования и репродукции, увеличению уровня эндогенных брассиностероидов, свободно-радикального окисления и пигментов. Совместное применение брассиностероидов и феруловой кислоты (в эквимольном соотношении) увеличивало эффективность их действия, проявляя синергическое взаимодействие при стимуляции ростовых и метаболических процессов, приводя к увеличению урожайности, а также улучшению качества зерна.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, 24-эпибрасинолид, 24-эпикастастерон, феруловая кислота, пигменты, малоновый диальдегид, иммуноферментный анализ

DOI: 10.31857/S0555109925020076 EDN: EOPQUB

В настоящее время к новым агрономическим биотехнологиям в растениеводстве, способствующим повышению урожайности и устойчивости сельскохозяйственных культур, относится использование биорегуляторов как факторов управления ростом и развитием растений, защиты от действия стрессоров различной природы. Рост растений представляет собой сложный интегральный процесс, который осуществляется вследствие реализации программ, контролирующей дифференциацию, развитие клетки, ткани, органа, целого организма при непосредственном участии фитогормонов и негормональных регуляторов роста, выступающих в растениях как единая функциональная система, между компонентами которой существует постоянное взаимодействие,

являющееся характерным их свойством и основой эндогенной и направленной регуляции онтогенеза и продуктивности растений.

Брассиностероиды (БС) широко распространены в растительном мире и обладают ярко выраженной росторегулирующей активностью [1]. Большое количество экспериментальных данных доказывает наличие взаимодействия БС и практически всех “классических” фитогормонов, включая влияние фитогормональных стероидов на метаболизм других гормонов и участие наряду с последними в интеграции различных сигналов, перенастройке в росте и стресс-адаптации [2]. В физиологическом плане с брассиностероидами много общего имеют фенольные соединения. Функциональная роль их также связана с ростом растений, фото-

синтезом, дыханием, защитой клеток и тканей от стрессовых воздействий [3, 4]. В литературе имеются данные о влиянии фитогормональных стероидов на содержание фенольных соединений в растительных тканях [5], что может свидетельствовать о метаболическом взаимодействии между этими группами веществ. Феруловая кислота (ФК), например, входящая в группу оксикоричных кислот, содержится практически во всех растениях. В зерне пшеницы ее количество составляет 0.8–2 г/кг сухой массы и может составлять до 90% от общего содержания полифенолов [6]. Ранее в лабораторных тестах было показано [7], что взаимодействие брассиностероидов и негормональных регуляторов роста — фенольных соединений (в частности, ФК) при предпосевной обработке семян приводят на начальном этапе развития растений пшеницы к активации ростовых функций, свободно-радикальному окислению и накоплению пигментов. При совместном применении БС и ФК эффективность их действия увеличивалась. В продолжение и развитие исследований в настоящей работе поставлена задача изучить в условиях лабораторного эксперимента действие стероидных фитогормонов, ФК и их смесей на ранние стадии развития растений пшеницы при опрыскивании (основной применяемый биотехнологический прием на зерновых культурах) в условиях полевого опыта.

Цель работы — изучить росторегулирующую активность брассиностероидов на растениях яровой пшеницы при совместном использовании их с феруловой кислотой.

МЕТОДИКА

Исследования проводили на растениях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна белорусской селекции, выращиваемых в лабораторных и полевых опытах. Синтез 24-эпибрасинолида (ЭБ) и 24-эпикастостерона (ЭК) осуществлен в лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси. Используемые в лабораторных тестах концентрации БС 10^{-7} М и 10^{-9} М, по предварительно полученным данным, являются оптимальными для стимуляции роста растений и наиболее характерными для действия БС [8]. ФК (“Sigma”, США) и БС применяли в эквимоллярных концентрациях. В лабораторных опытах посев производили сухими семенами в пластиковые сосуды с почвой объемом 0.8 л по 25 семян в сосуд. Почва дерново-подзолистая, суглинок. Влажность субстрата поддерживалась на уровне 70% от полной влагоемкости, освещение — светодиодный светильник (красно-синий свет) ДБП-03-14-820 мощностью 14 Вт (“Блок Модуль”, Беларусь), фотопериод — 16 ч, температура (день/ночь) 22/20°C в течение 14 сут после появления всходов. Обработку путем опрыскивания проводили на 5 сут

после посева, по всходам. Количество раствора для обработки составляло 2.5 мл на сосуд. Активность ростовых процессов оценивали по длине и массе надземной части растений на 14 сут после опрыскивания растворами соединений.

В полевых опытах проводили изучение дифференцированного и совместного действия БС и ФК на процессы роста и развития растений, зерновую продуктивность яровой пшеницы. Полевые исследования проводили с соблюдением требований методики опытного дела [9]. Опыты закладывали на экспериментальной базе РУП “НПЦ НАН Беларуси по земледелию” (г. Жодино, Беларусь), используя общепринятую для хозяйств Беларуси агротехнику возделывания культуры в соответствии с отраслевым регламентом [10]. Почва опытного участка дерново-подзолистая среднеподзоленная, легкосуглинистая. Агрохимическая характеристика пахотного слоя: содержание P_2O_5 — 225–259 мг/кг, K_2O — 240–296 мг/кг почвы по методу Кирсанова, слабокислая реакция (рН KCl — 5.8–6.0) почвенной среды, гумус — 1.9–2.2%. Размещение делянок систематическое, учетная площадь — 5 м², повторность — 4-кратная. Обработку растений проводили путем опрыскивания в фазе начала выхода в трубку. Стадии развития растений приведены согласно десятичному коду по шкале ВВСН [11]. Каждую делянку обрабатывали 500 мл соответствующего раствора, используя характерную для БС гектарную дозу ЭБ, которая составляет 25 мг/га и эквимоллярное количество ФК (10 мг/га).

Анализ морфологических особенностей развития и структуры урожая проводился методом снопа (индивидуального анализа 25 растений в апробационном снопе в четырехкратной повторности по каждому варианту). Уборку и учет урожая проводили поделочно комбайновым методом с использованием селекционного зерноуборочного комбайна “Wintersteiger Classic” (Германия). Содержание белка и клейковины в зерне определяли согласно ГОСТ 10846-91 и ГОСТ Р 54478-2011. Показаны средние значения и их стандартные отклонения. Достоверность различий рассчитывали по *t*-критерию Стьюдента. Обсуждаются различия, достоверные при $p \leq 0.05$. Представлены результаты полевых опытов 2023 г. Метеорологические условия в период проведения исследований значительно отличались от среднесезонных показателей, особенно по количеству выпавших осадков. Гидротермический коэффициент (ГТК) за основную часть периода вегетации составил 0.8 при среднесезонном уровне этого показателя для региона, где проводили исследования 1.63, что свидетельствует о недостаточном увлажнении в период вегетационного периода. Среднесуточная температура воздуха в зависимости от периода превышала норму на 0.8–2.7°C. Июнь характеризовался повышенной температурой воздуха во второй

и третьей декаде, которая была выше нормы на 2.7 и 2.2°C соответственно. При этом по количеству выпавших осадков, все декады характеризовались низким уровнем, который составил 18, 27 и 49% от нормы соответственно. Первая декада июля характеризовалась повышенной температурой воздуха и недостаточным увлажнением. Если первый из указанных выше показателей превышал норму на 0.8°C, то второй составил лишь 53.0% от среднемесячного.

Определяли содержание пигментов и малонового диальдегида (МДА) в листьях, которые анализировали в фазы цветения и восковой спелости зерна. Для определения содержания хлорофилла и МДА использовали флаговые листья 15–20 растений, собранных на делянках, из которых формировали пробы и замораживали в жидком азоте. Для оценки содержания пигментов в полевых опытах свежий измельченный растительный материал (0.1 г) заливали 100%-ным уксусом в емкостях с притертыми крышками, помещали в темное место и через 48 ч экспозиции подвергали спектрофотометрическому измерению для определения концентраций пигментов [12]. Оптическую плотность экстракта измеряли на спектрофотометре “NanoDrop 2000” (“Thermo Fisher Scientific”, США) со специализированным программным обеспечением с подключением к ПК.

Интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) в полевых опытах оценивали по образованию МДА в реакции с тиобарбитуровой кислотой при нагревании [13]. Навеску свежей массы (0.5 г) растирали до гомогената в ступке с 1 мл реакционной среды, состоящей из 0.25%-ного раствора тиобарбитуровой кислоты в 10%-ном растворе трихлоруксусной кислоты, приготовленной на дистиллированной воде непосредственно перед каждым опытом. Гомогенат переносили в пробирки, обмывая ступку небольшими порциями реакционной среды, это называется количественно. Конечный объем составлял 4 мл. Гомогенат хорошо перемешивали, пробирки плотно закрывали и помещали в нагретую до 95–100°C водяную баню на 30 мин. Затем пробирки охлаждали, содержимое центрифугировали 15 мин при 8000 g. Оптическую плотность супернатанта измеряли на спектрофотометре “NanoDrop 2000” (“Thermo Fisher Scientific”, США) со специализированным программным обеспечением с подключением к ПК при длине волны 532 нм. Количество МДА рассчитывали, используя молярный коэффициент экстинкции — $1.55 \times 10^5 / (\text{М см})$.

Для количественной оценки эндогенного содержания БС методом ИФА растительные образцы (надземную часть) отбирали на 7 и 14 сут после опыливания в лабораторном эксперименте и в фазы цветения, молочной и восковой спелости зерна в полевом опыте. Образцы фиксировали при –70°C и лиофильно высушивали под вакуумом

на приборе VirTis 6211 “LabX” (США). Лيوфилизированные образцы гомогенизировали в буферном растворе (pH 7.4, 0.05 М Трис) с помощью диспергатора IKA T 18 digital ULTRA-TURRAX® (“IKA-Werke GmbH & Co. KG” (Германия). Для более глубокой экстракции гомогенаты выдерживали в течение 24 ч при –20°C, затем образцы центрифугировали на приборе Eppendorf® MiniSpin Plus (“Eppendorf”, Германия), полученный супернатант анализировали. Количественную оценку проводили методом двухстадийного иммуноферментного анализа с использованием разработанных ранее и производящихся в Институте биоорганической химии НАН Беларуси иммуноферментных тест-систем для следующих групп brassinosterоидов: 24R-метилБС (включает ЭБ, ЭК и 6-дезоксо-24-эпикастастерон), 24S-метилБС (брасинолид, кастастерон и 6-дезоксокастастерон), 28-гомоБС (28-гомобрасинолид и 28-гомокастастерон) [14, 15]. В полистирольные лунки 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 и 5 нмоль/л. Планшет инкубировали при 37°C в течение 2 ч, после чего содержимое лунок удаляли и промывали их промывочным раствором (4 × 150 мкл). Затем во все промытые лунки добавляли по 150 мкл раствора конъюгата соответствующего brassinosterоида с пероксидазой хрена (ПХ) и инкубировали 5 мин при 37°C. Затем удаляли содержимое, промывали, как описано выше, добавляли по 150 мкл хромоген-субстратной смеси и инкубировали при 37°C в течение 20 мин. Останавливали реакцию добавлением во все лунки по 50 мкл раствора стоп-реагента (5%-ного раствора H₂SO₄). Оптическую плотность раствора во всех лунках измеряли на фотометре универсальном Ф300ТП (“Витязь”, Беларусь) при длине волны 450 нм. Для каждой калибровочной пробы рассчитывали средние арифметические значения оптической плотности, строили график зависимости показателя $B/B_0 \cdot 100\%$ от концентрации brassinosterоида в калибровочных пробах (нмоль/л), где B и B₀ — значения оптической плотности продукта ферментативной реакции в присутствии и отсутствие свободного brassinosterоида соответственно. Методом интерполяции по калибровочному графику рассчитывали концентрацию БС (нмоль/л) в анализируемой пробе. Сигмоидальные калибровочные кривые линеаризовали с помощью преобразования $\log\text{-logit}$: $\text{logit } B/B_0 = \ln((B/B_0)/(100 - B/B_0))$. Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью программы Microsoft Office Excel 2010.

Эксперименты повторяли независимо трижды при трехкратной повторности в каждой серии. Представлены средние значения и их стандартные

отклонения. Достоверность различий рассчитывали по *t*-критерию Стьюдента. Обсуждаются различия, достоверные при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние brassinosterоидов и феруловой кислоты на рост, развитие и продуктивность яровой пшеницы. В лабораторных опытах под влиянием БС, ФК и их композиций активировался рост растений яровой пшеницы и накопление ими биомассы. Индивидуальные вещества стимулировали рост в среднем на 8%, смеси — на 15% (табл. 1). Наиболее активна

была смесь ЭБ и ФК в концентрации 10^{-9} М. Под ее воздействием рост и накопление биомассы растениями увеличивались на 17 и 26% соответственно.

В полевых условиях БС и смеси их с ФК оказывали положительное влияние на морфогенез стебля, стимулируя его рост в высоту, образование боковых побегов и накопление массы (табл. 2). Смеси оказывали также более эффективное действие на образование продуктивных побегов и накопление их массы по сравнению с отдельно взятыми соединениями, при этом количество непродуктивных побегов было статистически

Таблица 1. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимольных смесей ЭБ или ЭК с ФК на ростовые показатели растений *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна на 14 сут после опрыскивания растворами веществ в лабораторных условиях

Вариант	Длина побега, мм	Сырая масса надземной части 10 растений, г
Контроль, вода	300.5 ± 9.65^a	2.51 ± 0.08^a
ЭБ, 10^{-9} М	324.5 ± 5.60^b	2.75 ± 0.05^b
ЭБ, 10^{-7} М	317.5 ± 7.08^b	2.62 ± 0.06^{ab}
ЭК, 10^{-9} М	318.2 ± 8.41^b	2.73 ± 0.05^b
ЭК, 10^{-7} М	329.5 ± 6.15^b	2.82 ± 0.07^{bc}
ФК, 10^{-9} М	323.5 ± 6.28^b	2.65 ± 0.08^{ab}
ФК, 10^{-7} М	332.1 ± 9.78^b	2.74 ± 0.06^b
ЭБ + ФК, 10^{-9} М	350.1 ± 7.67^c	3.16 ± 0.07^c
ЭБ + ФК, 10^{-7} М	339.5 ± 4.67^{bc}	2.90 ± 0.05^{bc}
ЭК + ФК, 10^{-9} М	347.5 ± 6.96^c	2.94 ± 0.05^{bc}
ЭК + ФК, 10^{-7} М	335.0 ± 6.48^{bc}	2.82 ± 0.06^{bc}

Примечание. Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

Таблица 2. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и смесей ЭБ или ЭК с ФК на ростовые показатели растений *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна в полевых условиях в фазе восковой спелости

Вариант	Кустистость продук- тивная, шт.	Высота главного стебля, см	Масса соломы в рас- чете на 10 стеблей, г
Контроль (вода)	1.25 ± 0.09^a	60.7 ± 1.87^a	5.4 ± 0.11^a
ЭБ, 25 мг/га	1.42 ± 0.04^b	71.8 ± 2.13^b	6.9 ± 0.31^b
ЭК, 25 мг/га	1.45 ± 0.06^b	72.1 ± 1.44^b	7.8 ± 0.36^c
ФК, 10 мг/га	1.35 ± 0.06^{ab}	67.7 ± 2.45^b	7.1 ± 0.33^b
ЭБ, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	1.51 ± 0.09^{bc}	68.8 ± 1.13^b	7.9 ± 0.42^c
ЭК, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	1.63 ± 0.09^{bc}	71.1 ± 1.43^b	8.4 ± 0.39^c

Примечание. Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

незначимым. В то же время добавление ФК к БС снижало эффективность стимулирующего действия последних на рост стебля.

Фитогормональные стероиды и ФК как по отдельности, так и в смесях при крайне неблагоприятных для формирования зерновой продуктивности засушливых условиях повышали урожайность яровой пшеницы, оказывая активизирующее действие на формирование генеративных органов растений. ЭБ и ЭК увеличивали этот показатель практически в равной степени — на 34 и 35% соответственно, ФК — на 30% (табл. 3). Смеси действовали гораздо эффективнее, повышая урожай также почти в равной степени — на 67% смесь ЭБ и ФК и на 62% смесь ЭК и ФК. Продуктивность повышалась за счет положительного действия соединений и их смесей на все элементы структуры урожая: число продуктивных стеблей на 1 м², число зерен в колосе и массу 1000 зерен, повышая эти показатели, в той или иной степени. Дифференцированное применение фиторегуляторов увеличивало число колосов на 10%, число зерен в колосе — на 18%, массу 1000 зерен — на 8% в среднем. Под влиянием ФК, наоборот, стимулировалось накопление массы 1000 зерен, в меньшей степени — число зерен в колосе, число колосов практически не изменялось. При применении смесей все показатели увеличивались равномерно и превышали показатели применения индиви-

дуальных соединений. Пшеница является одной из основных зерновых культур, возделываемых в Беларуси и России. Это обстоятельство на первый план выдвигает задачу получения полноценной продукции с высокими показателями пищевой ценности. Часто при высоких показателях урожайности содержание белка в зернах понижено, поэтому очень важно оценить данный параметр, так как от содержания массовой доли белка в пшенице зависят питательная и товарная ценность. Из табл. 4 видно, что применение как отдельно ЭБ, так и его в смеси с ФК приводило к увеличению содержания белка. Важным показателем качества пшеницы является наличие клейковины, которая в значительной степени определяет хлебопекарное качество зерна. Обработка посевов пшеницы ЭБ, а также смесью его с ФК приводила к заметному росту содержания клейковины в зерне (табл. 4), позволяющему отнести его к высшему классу.

Таким образом, результаты настоящего исследования свидетельствуют о том, что совместное воздействие БС и ФК, примененных путем опрыскивания, на начальный рост вегетирующих растений яровой пшеницы и формирование генеративных органов культуры позволило не только полностью сохранить стимулирующую ростовую и формообразовательную активность фитогормональных стероидов, но и получить синергический эффект. Сравнение росторегулирующей актив-

Таблица 3. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимоллярных смесей ЭБ или ЭК с ФК на продуктивность растений *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна в полевых условиях в фазе восковой спелости

Вариант	Число продуктивных стеблей на 1 м ² , шт.	Число зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г	Урожайность, ц/га
Контроль (вода)	565 ± 10.8 ^a	30.7 ± 1.39 ^a	38.0 ± 0.25 ^a	27.7 ± 4.45 ^a
ЭБ, 25 мг/га	615 ± 13.2 ^b	35.5 ± 1.72 ^b	41.8 ± 0.32 ^b	37.0 ± 4.46 ^b
ЭК, 25 мг/га	635 ± 10.1 ^b	36.5 ± 1.21 ^b	40.1 ± 0.85 ^b	37.3 ± 4.98 ^b
ФК, 10 мг/га	595 ± 15.0 ^b	34.3 ± 1.17 ^b	42.7 ± 0.55 ^b	35.9 ± 4.81 ^b
ЭБ, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	686 ± 19.2 ^c	37.9 ± 1.01 ^b	44.5 ± 0.33 ^c	46.2 ± 4.88 ^c
ЭК, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	700 ± 14.8 ^c	37.7 ± 1.23 ^b	43.8 ± 0.46 ^c	44.8 ± 4.56 ^c

Примечание. Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

Таблица 4. Влияние ЭБ, ФК и эквимоллярных смесей ЭБ с ФК на содержание белка и клейковины в зерне яровой пшеницы *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна в полевых условиях

Вариант	Содержание белка, %	Содержание клейковины, %
Контроль (вода)	17.7	36.3
ЭБ, 25 мг/га	18.5	38.4
ЭБ, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	18.0	39.2

ности БС и ФК показало, что принципиальных отличий между ними не наблюдалось. Соединения различались лишь по степени воздействия на тот или иной показатель роста и развития растения. Фитогормональные стероиды, например, повышали зерновую продуктивность яровой пшеницы, оказывая более активное влияние на формообразовательные процессы (стимуляция образования боковых побегов и завязываемости семян), тогда как ФК проявляла более высокую аттрагирующую активность, увеличивая массу 1000 зерен. В смесях проявился синергизм действия, в равной степени стимулировались все показатели, при этом под влиянием смесей наблюдалось значительное повышение урожая по сравнению с индивидуальными веществами. Данные по содержанию белка и клейковины в зерне свидетельствовали также о том, что совместное использование стероидных фитогормонов и ФК приводит не только к значительному росту урожайности, но и улучшает его качество. Следует особо отметить результаты полевых опытов, так как урожай формировался при очень неблагоприятных погодных условиях (в течение всей вегетации наблюдалась высокая температура воздуха и низкая увлажненность почвы), а процессы опыления и оплодотворения чрезвычайно чувствительны к засухе и недостатку влаги [16]. В таких условиях эффект экзогенного воздействия природных регуляторов возрастает. Таким образом, добавление ФК усиливало антистрессовые свойства БС, известных как фиторосторегуляторы-адаптогены, повышающих

устойчивость растений к различного рода повреждающим воздействиям [17, 18].

Влияние brassinosterоидов и феруловой кислоты на эндогенное содержание фитогормональных стероидов. При использовании экзогенных регуляторов роста результат их действия зависит от эндогенного содержания фитогормонов, оптимальный уровень которых является важным индикатором нормального роста и развития растений. Обнаруженные нами изменения роста растений яровой пшеницы под влиянием БС и ФК могли быть обусловлены, прежде всего, изменением эндогенного уровня фитогормональных стероидов.

На рис. 1–3 представлены результаты изучения динамики эндогенного содержания БС в растениях яровой пшеницы, выращенных в лабораторных условиях. Представленные на рис. 1 результаты показывают, что при опрыскивании проростков растворами БС ряда ЭБ и их смесями с ФК в концентрации 10^{-7} М происходило значительное повышение эндогенного уровня 24R-метилБС по сравнению с контрольным образцом уже на 7 сут после опрыскивания растворами веществ. При обработке растений растворами концентрацией 10^{-9} М содержание 24R-метилБС в испытуемых образцах оставалось на уровне контроля или незначительно увеличивалось. Однако на 14 сут после обработки во всех вариантах, в том числе и ФК, наблюдалось повышение уровня БС данного ряда по сравнению с контролем. Существенное повышение эндогенного содержания БС ряда brassinolidов наблюдалось уже на 7 сут от начала воздействия при

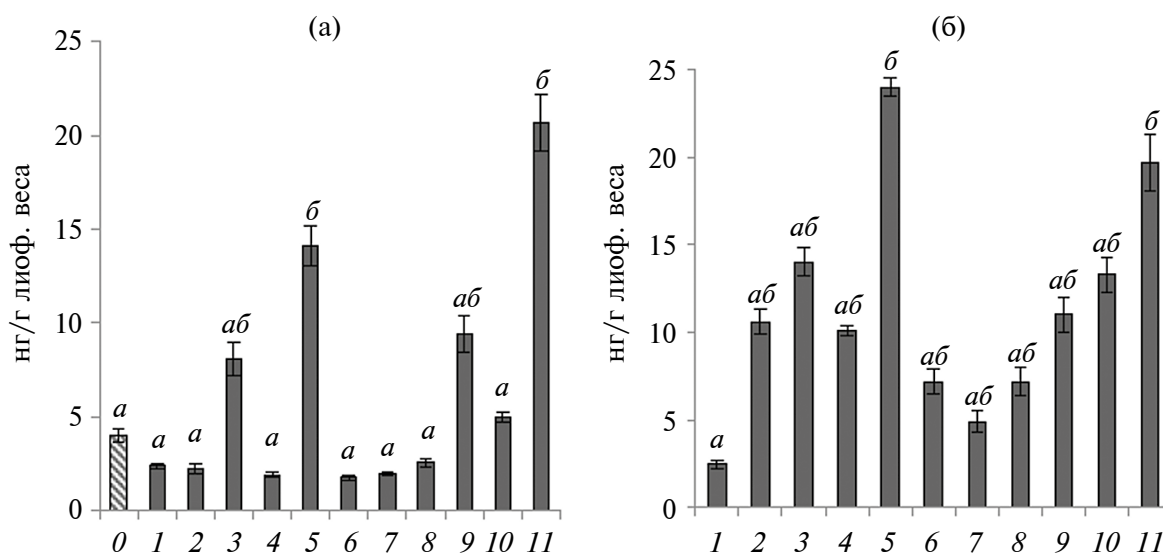


Рис. 1. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимоларных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание 24R-метилбрасиностероидов в растениях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна на 7 (а) и 14 сутки (б) от начала обработки растворами веществ в лабораторных условиях: 0 — контроль (образец зафиксирован в день обработки до ее начала), 1 — контроль (вода); 2 — ЭБ (10^{-9} М), 3 — ЭБ (10^{-7} М), 4 — ЭК (10^{-9} М), 5 — ЭК (10^{-7} М), 6 — ФК (10^{-9} М), 7 — ФК (10^{-7} М), 8 — ЭБ + ФК (10^{-9} М), 9 — ЭБ + ФК (10^{-7} М), 10 — ЭК + ФК (10^{-9} М), 11 — ЭК + ФК (10^{-7} М). Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

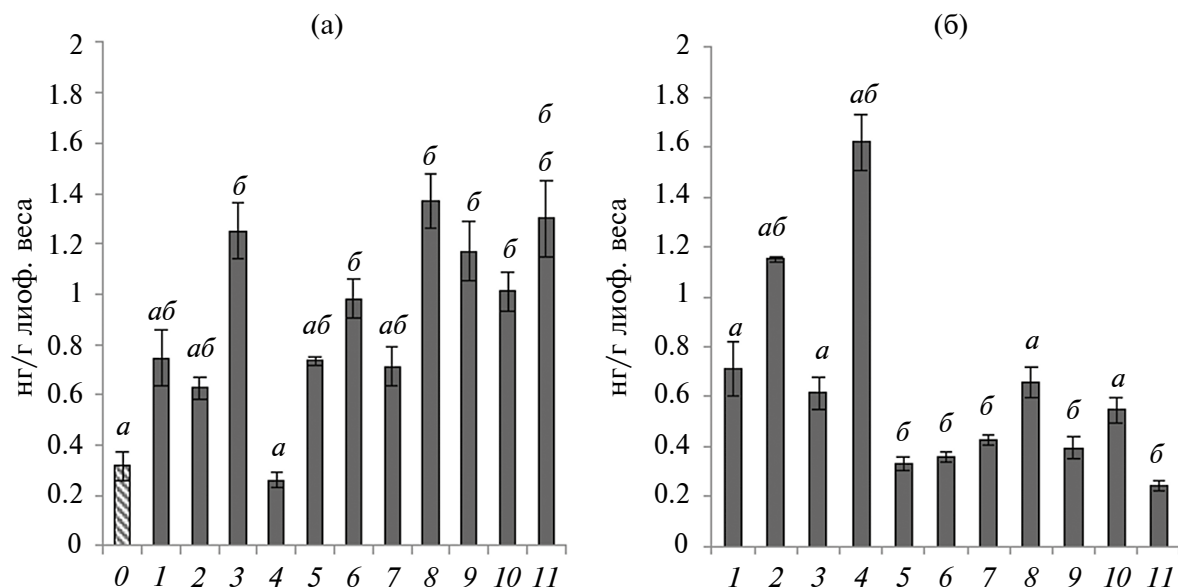


Рис. 2. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимольных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание 24S-метилбрассиностероидов в растениях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна на 7 (а) и 14 сут (б) от начала обработки растворами веществ в лабораторных условиях: 0 — контроль (образец зафиксирован в день обработки до ее начала), 1 — контроль (вода); 2 — ЭБ (10^{-9} М), 3 — ЭБ (10^{-7} М), 4 — ЭК (10^{-9} М), 5 — ЭК (10^{-7} М), 6 — ФК (10^{-9} М), 7 — ФК (10^{-7} М), 8 — ЭБ + ФК (10^{-9} М), 9 — ЭБ + ФК (10^{-7} М), 10 — ЭК + ФК (10^{-9} М), 11 — ЭК + ФК (10^{-7} М). Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

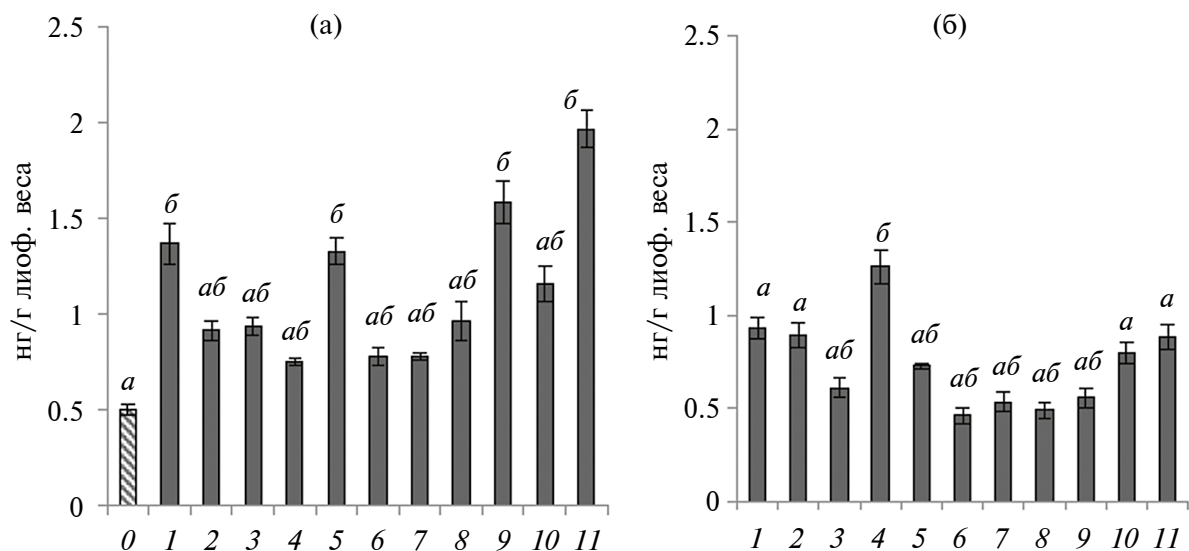


Рис. 3. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимольных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание 28-гомобрассиностероидов в растениях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна на 7 (а) и 14 сутки (б) от начала обработки растворами веществ в лабораторных условиях: 0 — контроль (образец зафиксирован в день обработки до ее начала), 1 — контроль (вода); 2 — ЭБ (10^{-9} М), 3 — ЭБ (10^{-7} М), 4 — ЭК (10^{-9} М), 5 — ЭК (10^{-7} М), 6 — ФК (10^{-9} М), 7 — ФК (10^{-7} М), 8 — ЭБ + ФК (10^{-9} М), 9 — ЭБ + ФК (10^{-7} М), 10 — ЭК + ФК (10^{-9} М), 11 — ЭК + ФК (10^{-7} М). Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

обработке растворами ЭБ в концентрации 10^{-7} М, а также смесями БС и ФК во всех изученных концентрациях (рис. 2). Использование раствора ЭК в концентрации 10^{-9} М приводило к снижению уровня данных гормонов в 2 раза. На 14 сутки по-

сле обработки во всех изученных вариантах, кроме ЭБ и ЭК в концентрации 10^{-9} М, наблюдалось присутствие 24S-метилБС на уровне контроля или ниже. На начальном этапе роста значительное повышение 28-гомоБС показано при совместной

обработке БС и ФК только в концентрации 10^{-7} М (рис. 3), в остальных вариантах содержание указанных БС или снижалось, или оставалось на уровне контрольного образца. На 14 сут во всех вариантах, за исключением ЭБ 10^{-9} М, наблюдалось содержание БС ряда 28-гомобрасинолида на уровне контрольного образца или его снижение. Таким образом, при опрыскивании растений пшеницы растворами БС и/или ФК, как правило, происходило повышение уровня эндогенных БС на 7 сут после обработки (растения, вероятно, получают толчок к развитию на начальной стадии роста), далее эндогенный уровень БС устанавливался на уровне контрольных значений.

На рис. 4–6 представлены результаты изучения динамики эндогенного содержания БС в растениях пшеницы, выращенных в полевых условиях. Надземную часть растений фиксировали в фазы цветения, молочной и восковой спелости зерна. В фазу цветения содержание БС ряда 24-эпибрасинолида в обработанных растениях не превышало уровня контрольного образца, а в некоторых вариантах даже наблюдалось снижение (рис. 4). В фазу молочной спелости зерна содержание указанных БС повышалось по сравнению с контролем во всех вариантах обработки, в большей степени при комбинированной обработке БС с ФК. В фазу восковой спелости зерна содержание 24R-метилБС оставалось выше, чем в контрольном образце при комбинированной обработке, хотя при обработке индивидуальными БС эндогенный статус понижался.

В случае с 24S-метилБС экзогенное внесение БС и/или ФК не вызывало значительных изменений эндогенного статуса указанной группы (рис. 5). Во всех исследованных фазах развития растений содержание БС данного ряда либо оставалось на уровне контрольных значений, либо наблюдалась тенденция к снижению их количества. Небольшое повышение содержания 24S-метилБС (в 1.5 раза) выявлено только в фазе восковой спелости зерна при обработке ЭБ.

К повышению содержания 28-гомоБС в растениях пшеницы в фазу цветения приводила обработка как индивидуальным ЭК, так и смесью его с ФК (рис. 6). В фазу молочной спелости зерна повышенный статус наблюдался только при комбинированном воздействии ЭК и ФК. В фазу восковой спелости зерна повышенный статус данной группы БС наблюдался при комбинированном воздействии ЭБ и ФК. В остальных случаях содержание 28-гомоБС было на уровне контроля или несколько ниже.

Таким образом, внесение БС ряда 24-эпибрасинолида, во-первых, ведет к изменению содержания БС других групп, во-вторых, изменение содержания каждой группы по мере роста и развития растений происходит по-разному. Результаты экспериментов однозначно свидетельствуют о влиянии ФК на биосинтез и метаболизм брассиностероидов, поскольку самое высокое содержание фитогормональных стероидов отмечалось при применении смесей, особенно на начальном этапе

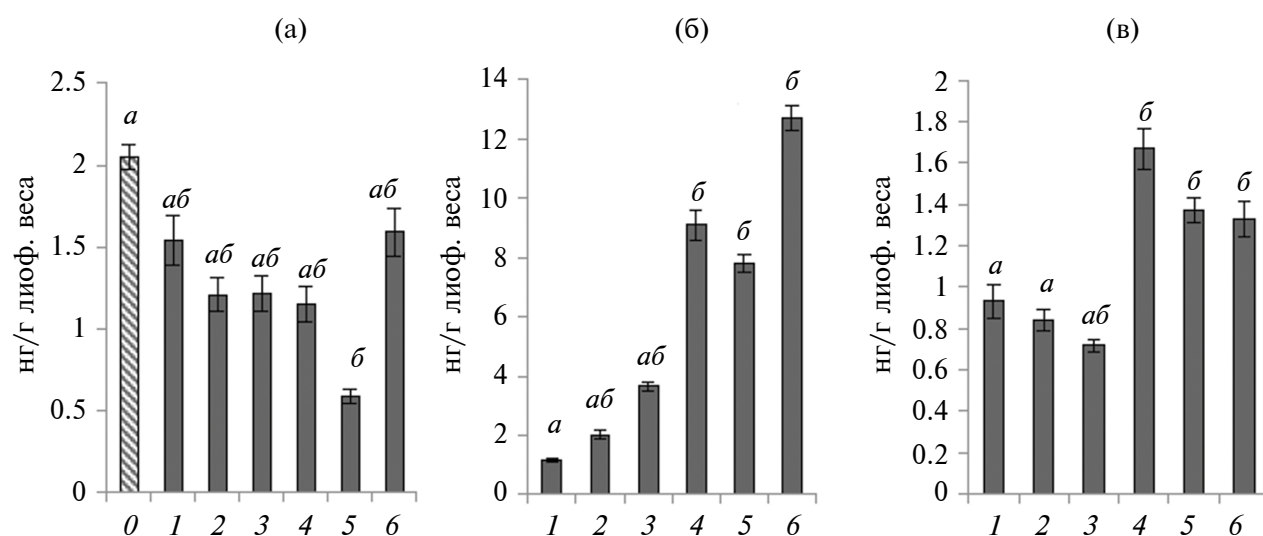


Рис. 4. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимольных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание 24R-метилбрассиностероидов в растениях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна в фазы цветения (а), молочной (б) и восковой спелости зерна (в) в полевых условиях: 0 — контроль (образец зафиксирован в фазу выхода в трубку до начала обработки), 1 — контроль (вода); 2 — ЭБ (25 мг/га), 3 — ЭК (25 мг/га), 4 — ЭБ (25 мг/га) + ФК (10 мг/га), 5 — ЭБ (12.5 мг/га) + ФК (10 мг/га), 6 — ЭК (25 мг/га) + ФК (10 мг/га). Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

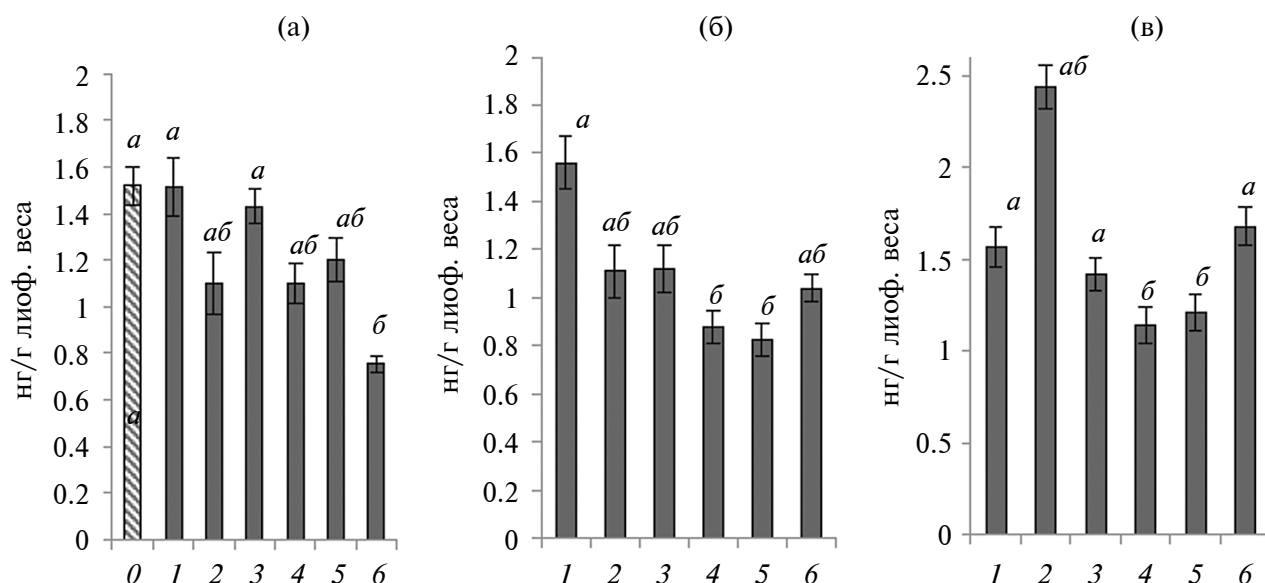


Рис. 5. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и их эквимольных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание 24S-метилбрасиностероидов в растениях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна в фазы цветения (а), молочной (б) и восковой спелости зерна (в) в полевых условиях: 0 — контроль (образец зафиксирован в фазе выхода в трубку до начала обработки), 1 — контроль (вода); 2 — ЭБ (25 мг/га), 3 — ЭК (25 мг/га), 4 — ЭБ (25 мг/га) + ФК (10 мг/га), 5 — ЭБ (12.5 мг/га) + ФК (10 мг/га), 6 — ЭК (25 мг/га) + ФК (10 мг/га). Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

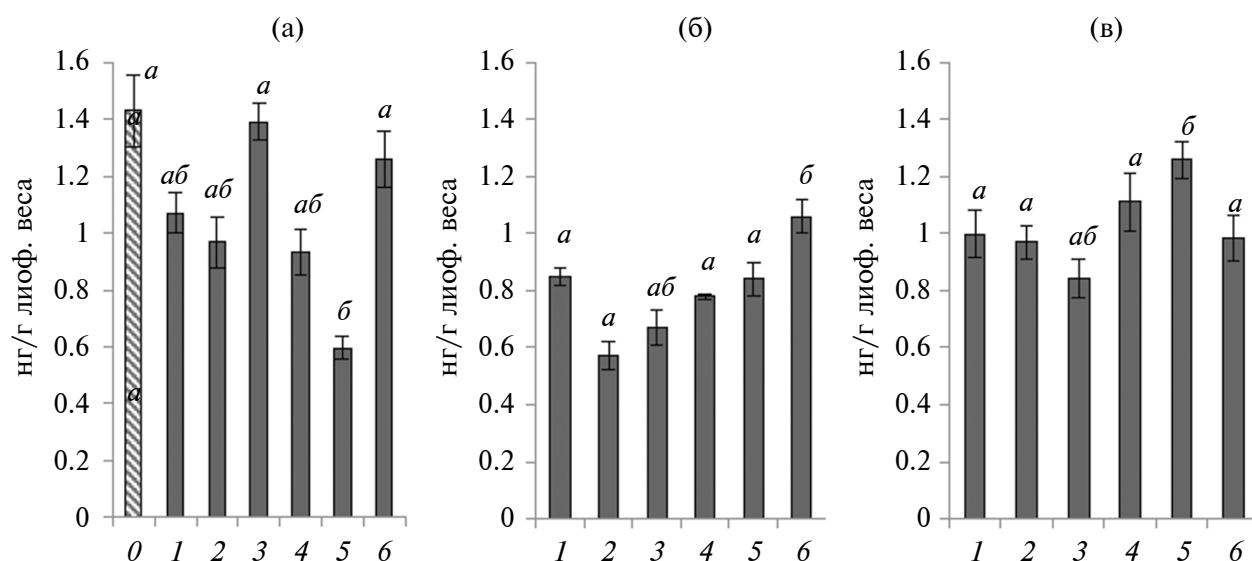


Рис. 6. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимольных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание 28-гомобрасиностероидов в растениях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна в фазы цветения (а), молочной (б) и восковой спелости зерна (в) в полевых условиях: 0 — контроль (образец зафиксирован в фазе выхода в трубку до начала обработки), 1 — контроль (вода); 2 — ЭБ (25 мг/га), 3 — ЭК (25 мг/га), 4 — ЭБ (25 мг/га) + ФК (10 мг/га), 5 — ЭБ (12.5 мг/га) + ФК (10 мг/га), 6 — ЭК (25 мг/га) + ФК (10 мг/га). Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

развития растений в лабораторных условиях, при самом активном росте. При изучении динамики эндогенных БС в полевых условиях, которое позволяет изучать различные фазы развития растений при более длительном временном интервале, показано, что повышенный эндогенный брассиностероидный статус растений также сохранялся в большей степени при комбинированной экзогенной обработке БС и ФК в эквимоллярных концентрациях, что в свою очередь, позволяло проявлять в большей мере их ростостимулирующее и стресс-протекторное действие. Это явление может быть связано также с повышением биодоступности стероидного фитогормона в присутствии кислоты, облегчающей его поступление в клетку.

Влияние брассиностероидов, феруловой кислоты и их смесей на содержание пигментов в листьях растений яровой пшеницы в полевом опыте. Содержание пигментов является чувствительным маркером физиологического состояния растений и их фотосинтетического аппарата, одним из показателей реакции растений на изменение факторов внешней среды и степени их адаптации к новым экологическим условиям. Снижение количества пигментов является универсальной реакцией на стресс [19, 20]. Сдвиги в количестве пигментов обнаруживались

на всем протяжении онтогенеза пшеницы после обработки регуляторами роста и их смесями. В фазе цветения уровень хлорофилла и каротиноидов во флаговом листе растений яровой пшеницы был повышен во всех вариантах опыта (табл. 5). Наиболее высокое содержание пигментов отмечено при обработке растений смесями ЭБ или ЭК и ФК. Смесь ЭБ и ФК увеличивала накопление хлорофилла на 57%, а смесь ЭК и ФК — на 43% по сравнению с контролем. К концу вегетации, в фазе восковой спелости зерна содержание хлорофилла в листьях контрольного варианта снизилось почти вдвое, тогда как во всех опытных вариантах сохранялось повышенное по сравнению с контролем содержание зеленых пигментов и каротиноидов. Добавление ФК к БС усиливало стимулирующее действие последних.

Полученные результаты указывают на наличие устойчивого положительного действия БС и ФК на накопление пигментов во флаговых листьях растений яровой пшеницы в течение всей вегетации, что увеличивало продолжительность работы ассимиляционного аппарата, интенсифицировало фотосинтез и приводило к повышению урожайности культуры в наибольшей степени под влиянием смесей фиторегуляторов. Поддержание высокого уровня содержания хлорофилла у пшеницы счита-

Таблица 5. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимоллярных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание пигментов во флаговых листьях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна при опрыскивании растений растворами веществ в фазу трубкования в полевых условиях

Вариант	Содержание пигментов, мг/г сырой массы	
	фаза цветения	фаза восковой спелости зерна
Хлорофилл $a + b$		
Контроль (вода)	1.12 ± 0.04^a	0.64 ± 0.03^a
ЭБ, 25 мг/га	1.28 ± 0.03^b	0.86 ± 0.02^b
ЭК, 25 мг/га	1.26 ± 0.02^b	0.88 ± 0.02^b
ФК, 10 мг/га	1.32 ± 0.03^b	0.80 ± 0.02^{ab}
ЭБ, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	1.76 ± 0.02^c	0.96 ± 0.01^c
ЭК, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	1.60 ± 0.03^d	1.12 ± 0.02^d
Каротиноиды		
Контроль (вода)	0.52 ± 0.02^a	0.32 ± 0.02^a
ЭБ, 25 мг/га	0.58 ± 0.01^{ab}	0.34 ± 0.02^{ab}
ЭК, 25 мг/га	0.62 ± 0.01^{ab}	0.36 ± 0.02^{ab}
ФК, 10 мг/га	0.66 ± 0.01^b	0.34 ± 0.02^{ab}
ЭБ, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	0.78 ± 0.02^c	0.40 ± 0.02^b
ЭК, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	1.12 ± 0.02^d	0.56 ± 0.02^c

Примечание. Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

ется желательным признаком в селекции на устойчивость к высоким температурам, поскольку он указывает на меньшую степень фотоингибирования при действии стрессора [21]. Таким образом, увеличение содержания фотосинтетических пигментов в клетках листьев растений под действием комбинированной обработки БС и ФК может свидетельствовать об усилении антистрессовых свойств БС при добавлении ФК.

Влияние brassinosterоидов и феруловой кислоты на содержание малонового диальдегида в листьях растений яровой пшеницы в полевом опыте. Свободнорадикальное или перекисное окисление липидов в настоящее время рассматривается как один из доминирующих метаболических процессов, которые обеспечивают регуляцию функциональной деятельности любых физиологических систем организма. Малоновый диальдегид является одним из конечных продуктов ПОЛ клеточных мембран, а его содержание, соответственно, может служить интегральной характеристикой соотношения процессов анаболизма и катаболизма биополимеров и использоваться в качестве индикатора окислительного стресса [22]. Чрезмерная активация ПОЛ может приводить к развитию патологических процессов [23].

Показано, что содержание МДА во флаговых листьях в фазе цветения значимо снижалась только под воздействием ФК (табл. 6). В то же время добавление ее к БС, наоборот, стимулировало накопление МДА в листьях в среднем на 25%. К концу вегетации в фазе восковой спелости зерна в контрольном варианте наблюдалось трехкратное увеличение содержания МДА в листьях. Отдельно взятые соединения ингибировали накопление МДА в среднем на 15, смеси — на 25%. По некоторым предположениям, накопление МДА наряду с усиленной генерацией пероксида водорода является одним из важных механизмов процесса старения растений, а действие высоких температур приводит к его ускорению [24]. Поэтому наблюда-

емое нами увеличение содержания МДА в 2.5 раза в листьях контрольного варианта в фазу молочной спелости (через 45 сут после обработки растворами веществ) по сравнению с цветением (15 сут после обработки веществами), вероятно, свидетельствует о снижении обмена веществ в листьях и их старении. В то же время ингибирование процессов ПОЛ под влиянием фиторегуляторов и их смесей указывает на сохранение функциональной активности листьев и свидетельствует об антистрессовом, адаптогенном действии БС, которое усиливается при добавлении ФК. Следует отметить, что через 15 сут после обработки добавление ФК к фитогормональным стероидам, наоборот, приводило к увеличению содержания МДА в листьях. Это свидетельствует о более высокой скорости образования АФК, что, вероятно, может быть причиной интенсификации метаболизма растений и приводить к увеличению продуктивности, поскольку по литературным данным АФК являются важными регуляторами роста и развития растений, в том числе оплодотворения [25, 26]. Производство АФК во время стресса может быть также сигналом к активации молекулярных путей, поддерживающих клеточный гомеостаз в стрессовых условиях [27].

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что использование ФК в смеси с БС не только влияет на баланс последних, изменяя их эндогенное содержание в течение всего онтогенеза растений яровой пшеницы от прорастания семян до формирования генеративных органов, но и непосредственно участвует в проявлении физиологического действия фитогормональных стероидов. При совместном использовании ФК и БС в полной мере проявился синергизм при действии на рост проростков, ростовые, морфообразовательные, физиолого-биохимические процессы и зерновую продуктивность яровой пшеницы. Проявление универсального синергизма между ФК и БС позволяет заключить, что их взаимодействие является

Таблица 6. Влияние ЭБ, ЭК, ФК и эквимоллярных смесей ЭБ или ЭК с ФК на содержание малонового диальдегида во флаговых листьях *Triticum aestivum* L. сорта Мадонна при опрыскивании растений растворами веществ в фазу трубкования в полевых условиях

Вариант	Содержание малонового диальдегида, мкМ/г сырой массы	
	фаза цветения	фаза восковой спелости зерна
Контроль (вода)	11.6 ± 0.21 ^a	37.2 ± 0.22 ^a
ЭБ, 25 мг/га	11.1 ± 0.20 ^{ab}	31.5 ± 0.23 ^{bc}
ЭК, 25 мг/га	12.5 ± 0.22 ^c	33.2 ± 0.21 ^c
ФК, 10 мг/га	10.1 ± 0.22 ^b	29.8 ± 0.23 ^b
ЭБ, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	14.7 ± 0.22 ^d	29.7 ± 0.24 ^b
ЭК, 25 мг/га + ФК, 10 мг/га	13.9 ± 0.21 ^{cd}	26.9 ± 0.26 ^d

Примечание. Достоверные различия на уровне $p \leq 0.05$ отмечены разными буквами.

эндогенным фактором роста и продуктивности растений яровой пшеницы и имеет перспективы практического использования для повышения устойчивости и продуктивности злаковых культур.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке БР ФФИ (грант X23РНФ-087).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

В настоящей статье не использовались в качестве объектов люди или животные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khripach V., Zhabinskii V., De Groot A.* // Annals of Botany. 2000. V. 86. P. 441–447.
<https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1227>
2. *Nanstaalen M., Benkova E.* // Annual Review of Cell and Development Biology. 2012. V. 28. P. 463–487.
<https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-101011-155741>
3. *Cheynier V., Comte G., Davis K.M., Lattanzio V., Martens S.* // Plant Physiol. Biochem. 2013. V. 72. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.009>
4. *Kumar S., Abedin M.M., Singh A.K., Das S.* // Plant Phenolics in Sustainable Agriculture. / Eds. R. Lone et al. Singapore: Springer Nature, 2020. P. 517.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1_22517
5. *Babalic Z.* // J. Agric. Sci. 2021. V. 27. № 3. P. 298–303.
<https://doi.org/10.15832/ancutbd.674860>
6. *Manach C., Scalbert A., Morand C., Rémésy C., Jiménez L.* // Am. J. Clin. Nutr. 2004. V. 79. P. 727.
<https://doi.org/10.1093/ajcn/79.5.727>
7. *Manzhalesava N.E., Litvinovskaya R.P., Savchuk A.L., Denisuk D.V., Khripach V.A.* // Russian Journal of Plant Physiology. 2024. V. 71. P. 97.
<https://doi.org/10.1134/S1021443724606426>
8. *Ламан Н.А., Кем К.Р., Хрипач В.А., Судник А.Ф.* // Докл. НАН Беларуси. 2016. Т. 60. № 6. С. 84–90.
<https://doklady.belnauka.by/jour/article/view/376>
9. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
10. *Привалов Ф.И., Павловский В.К., Гракун В.В., Лапа В.В., Сорока С.В., Вахонин Н.К., Шиманский Л.П.* Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных культур // Сборник отраслевых регламентов. Нац. акад. наук Беларуси, НППЦ НАН Беларуси по земледелию / Под ред. В.Г. Гусакова, Ф.И. Привалова.
http://fhfortuna.com/f/privalov_fi_organizatsionno-tekhnologicheskiye_normativy_vozdelyvaniya_zernovykh_zernobobovykh_krupyanykh_kultur_2012_kopiya.pdf
11. *Meier U.* Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph. Quedlinburg: Julius Kühn-Institut, 2018. 204 p.
<https://doi.org/10.5073/20180906-074619>
12. Патент РФ. 2005. № 244916.
13. *De Vos C.H.R., Schat H., Vooijs R., Ernst W.H.O.* // J. Plant Physiol. 1989. V. 135. P. 164.
14. *Khripach V.A., Zhabinskii V.N., Litvinovskaya R.P.* // Brassinosteroids: a Class of Plant Hormones. / Eds. S. Hayat, A. Ahmad. Springer. 2011. P. 375–392.
15. *Pradko A.G., Litvinovskaya R.P., Sauchuk A.L., Drach S.V., Baranovsky A.V., Zhabinskii V.N., et al.* // Steroids. 2015. V. 97. P. 78.
<https://doi.org/10.1016/j.steroids.2014.08.022>
16. *Hatfield J.L., Prueger J.H.* // Weather and Climate Extremes. 2015. №10. P. 4.
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.01>
17. *Khripach V.A., Zhabinskii V.N., Khripach N.B.* New Practical Aspects of Brassinosteroids and Results of their Ten-year Agricultural Use in Russia and Belarus // Brassinosteroids. Bioactivity and Crop Productivity. / Eds. S. Hayat, A. Ahmad. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2003. P. 189–230.
https://doi.org/10.1007/978-94-017-0948-4_9
18. *Nolan T.M., Vukasinovic N., Liu D., Russinova E., Yin Y.* // Plant Cell. 2020. V. 32. P. 295.
<https://doi.org/10.1105/tpc.19.00335>
19. *Khan N.A., Khan S., Naz N., Shah M., Irfanullah, Ahmad S., Sher H., Khan A.* // International Journal of Biosciences. 2017. V. 11. № 4. P. 173.
<http://dx.doi.org/10.12692/ijb/11/4/173-183>
20. *Kohila S., Gomathi R.* // Indian J. Plant Physiol. 2018. V. 23. № 2. P. 245.
<https://doi.org/10.1007/s40502-018-0363-y>
21. *Лиховидова В.А., Газе В.Л., Ионова Е.В.* // Аграрная наука. 2020. Т. 340. № 7. С. 86.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-340-7-86-89>
22. *Apel K., Hirt H.* Reactive // Annu. Rev. Plant Biol. 2004. V. 55. P. 373.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>
23. *Gill S., Tuteja N.* // Plant Physiol. Biochem. 2010. V. 48. P. 909.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
24. *Sung J.M., Jeng T.L.* // Physiologia Plantarum. 1994. V. 91. № 1. P. 51.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb00658.x>
25. *Mangano S., Martínez Pacheco J., Marino-Buslje C., Estevez J.M.* // Trends in Plant Science. 2018. V. 23. № 6. P. 479.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.02.008>
26. *Breygina M., Schekaleva O., Klimenko E., Luneva O.* // Plants. 2022. V. 11. P. 993.
<https://doi.org/10.3390/plants11070993>
27. *Miller G., Suzuk N., Ciftci-Yilmaz S., Mittler R.* // Plant Cell Environ. 2010. V. 33. P. 453.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x>

Growth-Regulating Activity of Brassinosteroid Compositions with Ferulic Acid on Spring Wheat Plants

R. P. Litvinovskaya^{a,*}, N. E. Manzhalesava^a, A. L. Sauchuk^a, D. V. Denisiuk^a,
I. G. Brui^b, and V. A. Khripach^a

^a*Institute of Bioorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220084 Belarus*

^b*Research and Practical Center of National Academy of Sciences of the Republic of Belarus for Arable Farming, Zhodino, 222160 Belarus*

*e-mail: litvin@iboch.by

The influence of steroid phytohormones (24-epibrassinolide and 24-epicastasterone), ferulic acid and their mixtures at all stages of ontogenesis on growth, morphoformation, physiological and biochemical processes and grain productivity of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) was studied. Compounds and their mixtures (in equimolar ratio) were used by spraying plants with solutions of substances in optimal concentrations. The dynamics of changes in the content of steroid phytohormones at the early stages of plant development and ontogenesis have been studied. It was shown that treatment of plants by spraying with brassinosteroids or ferulic acid led to the activation of growth processes, the productivity of morphogenesis and reproduction, and an increase in the level of endogenous brassinosteroids, free radical oxidation and pigments. The combined use of brassinosteroids and ferulic acid increased the effectiveness of their action, exhibiting a synergistic interaction in stimulating growth and metabolic processes and leading to an increase in yield, as well as an improvement in grain quality.

Keywords: *Triticum aestivum*, 24-epibrassinolide, 24-epicastasterone, ferulic acid, photosynthetic pigments, malondialdehyde, enzyme immunoassay