ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 581.14; 577.175.1
https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-292-299

Поступила в редакцию 04.05.2026
Received 04.05.2026

А. А. Боровик, П. А. Небышинец, Т. В. Самович, Н. А. Ламан

Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РОСТА ПРОРОСТКОВ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ПРИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН БРАССИНОСТЕРОИДАМИ

Аннотация. В статье приведены результаты анализа проростков сахарной свеклы, семена которых перед посевом были инкрустированы защитно-стимулирующими составами (ЗСС) на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВА), содержащими брассинолид (БЛ, ЗСС-БЛ) или эпибрассинолид (ЭБЛ, ЗСС-ЭБЛ) в концентрации 10^{-8} М. Изучены ростовые параметры, содержание фотосинтетических пигментов и фотосинтетическая активность растений. Установлено, что обработка семян ЗСС-ЭБЛ обеспечила увеличение массы корня проростков на 56 % относительно контроля. Методом PAM-флуориметрии выявлено, что ЗСС-БЛ снижает нерегулируемые потери энергии фотосистемы (ФС) II (*Y(NO)*) на 24 % и повышает эффективность работы ФС II (*Y(II)*) на 62 %.

Ключевые слова: сахарная свекла, *Beta vulgaris*, брассиностероиды, брассинолид, эпибрассинолид, предпосевная обработка семян, фотосинтез, PAM-флуориметрия

Для цитирования: Физиолого-биохимические особенности роста проростков сахарной свеклы при предпосевной обработке семян брассиностероидами / А. А. Боровик, П. А. Небышинец, Т. В. Самович, Н. А. Ламан // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 292–299. https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-292-299

Anastasiya A. Borovik, Polina A. Nebyshinets, Tatsiana V. Samovich, Nikolai A. Laman

V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL FEATURES OF SUGAR BEET SEEDLING GROWTH UNDER PRE-SOWING SEED TREATMENT WITH BRASSINOSTEROIDS

Abstract. The article presents the results of the analysis of sugar beet seedlings whose seeds were encrusted before sowing with protective-stimulating compositions (PSC) based on polyvinyl acetate dispersion (PVA) containing either brassinolide (BL, PSC-BL) or epibrassinolide (EBL, PSC-EBL) at a concentration of 10^{-8} M. Growth parameters, photosynthetic pigment content, and photosynthetic activity of plants were studied. It was found that seed treatment with PSC-EBL provided an increase in the root mass of seedlings by 56 % relative to the control. Using PAM-fluorimetry, it was revealed that PSC-BL reduces unregulated energy losses of photosystem (PS) II (*Y(NO)*) by 24 % and increased the efficiency of PS II (*Y(II)*) by 62 %.

Keywords: sugar beet, *Beta vulgaris*, brassinosteroids, brassinolide, epibrassinolide, pre-sowing seed treatment, photosynthesis, PAM-fluorimetry

For citation: Borovik A. A., Nebyshinets P. A., Samovich T. V., Laman N. A. Physiological and biochemical features of sugar beet seedling growth under pre-sowing seed treatment with brassinosteroids. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 4, pp. 292–299 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-4-292-299

Введение. Сахарная свекла (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *altissima*) – важная техническая культура умеренной климатической зоны, обеспечивающая до 30–40 % мирового производства сахара [1, 2]. Наряду с сахарной свеклой, хозяйственно значимыми формами рода *Beta* являются столовая свекла (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* var. *vulgaris*), кормовая свекла и листовая свекла мангольд (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris* var. *cicla*) [3].

В Республике Беларусь выращивание сахарной свеклы играет важную роль в обеспечении продовольственной безопасности и экспортного потенциала страны [4]. Однако стабильное развитие отрасли сталкивается с рядом лимитирующих факторов. Анализ климатических данных последних десятилетий продемонстрировал учащение продолжительных засушливых перио-

дов в середине и конце вегетационного сезона. Так, в засушливые годы (2010, 2015, 2018, 2022) потери урожая сахарной свеклы превысили 30 % и значительно снизилась сахаристость корнеплодов – с 18–20 до 14–15 % [5, 6].

Проблему также представляет и эндогенный дефицит питания проростков современных односемянных гибридов. Эволюционный переход от многосемянных диких форм к технологичным односемянным, удобным для механизированного сева, привел к существенному сокращению стартовых запасов питательных веществ для прорастающего зародыша. Немаловажным аспектом является не только общая масса, но и доля зародыша в структуре семени, которая составляет 20–30 %. Это означает, что ограниченный запас питательных веществ, получаемый зародышем культурной свеклы для старта, лимитирует энергию прорастания, рост и устойчивость проростков. Дополнительным негативным фактором является наличие в паренхимной ткани перикарпия ингибиторов прорастания, которые замедляют и подавляют всхожесть, вынуждая проводить более мелкую заделку семян [7].

Ситуация усугубляется высокой импортозависимостью в семеноводстве сахарной свеклы, которая достигает для Республики Беларусь 90–95 % [8]. Низкая эффективность отечественного семеноводства, связанная с неполным вызреванием семян на втором году вегетации в погодных условиях Беларуси и отсутствием заводов по их дражированию, увеличивает перечень проблем.

В связи с этим актуальным представляется разработка и применение защитно-стимулирующих составов (ЗСС) для предпосевной обработки семян, которые позволили бы компенсировать эндогенный дефицит питания, нивелировать действие ингибиторов прорастания и повысить стрессоустойчивость проростков на начальных этапах онтогенеза. Среди широкого спектра физиологически активных соединений, способных эффективно решать эти задачи, особого внимания заслуживают брассиностероиды (БС).

БС представляют собой класс полигидроксилированных стероидных фитогормонов, к которым относятся брассинолиды (БЛ) и их стереоизомеры эпибрассинолиды (ЭБЛ). Они обладают высокой физиологической активностью в сверхнизких концентрациях (10^{-6}–10^{-10} М) [9, 10]. В ряде работ показано, что БС участвуют в регуляции широкого спектра физиологических процессов: стимуляции деления и растяжения клеток, индукции синтеза стресс-индуцированных белков, активации антиоксидантной системы, стабилизации клеточных мембран и повышении эффективности функционирования фотосинтетического аппарата в неблагоприятных условиях [11–13].

Вместе с тем, несмотря на доказанную эффективность БС в регуляции роста и развития многих видов растений, данные об их действии на представителей семейства *Amaranthaceae* остаются фрагментарными.

Цель данного исследования – определить влияние предпосевной обработки семян ЗСС-БЛ и ЗСС-ЭБЛ в концентрации 10^{-8} М на морфофизиологические параметры и функциональное состояние фотосинтетического аппарата у растений сахарной свеклы на начальных этапах онтогенеза.

Объекты и методы исследования. В качестве объекта исследования был использован триплоидный гибрид сахарной свеклы урожайно-сахаристого направления Каскад 3 F1, зарегистрированный в 2006 г. Выбор данного гибрида для эксперимента обусловлен его высокой адаптацией к стрессовым факторам.

Основой для создания ЗСС послужила базовая пленкообразующая композиция на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВА) – водорастворимого синтетического полимера, широко применяемого в сельскохозяйственной практике для инкрустации и дражирования семян. ПВА формирует на поверхности семени тонкую прочную пленку, обеспечивающую удержание биологически активных веществ и их постепенное высвобождение в процессе прорастания.

На основе этой композиции были приготовлены два защитно-стимулирующих состава: ЗСС-БЛ, содержащий БЛ в концентрации 10^{-8} М, и ЗСС-ЭБЛ, содержащий ЭБЛ в той же концентрации. Использованные в работе природные БС получены в лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси.

Инкрустацию семян проводили вручную из расчета 20 мкл рабочего раствора на 1 г семян (что соответствует 20 л/т в производственных условиях). Семена тщательно перемешивали с рас-

четным объемом ЗСС до равномерного покрытия, после чего подсушивали в течение 24 ч при комнатной температуре. Контролем служили необработанные семена.

Растения выращивали в контролируемых лабораторных условиях в пластиковых стаканах объемом 0,5 л в почвенном субстрате «Двина» с агроперлитом в соотношении 3 : 1 в течение 30 сут, при температуре 22–23 °С, фотопериод – 14 ч света / 10 ч темноты, освещенность составляла 17 000–18 000 лк. Полив осуществляли, поддерживая влажность субстрата на уровне 78–80 %. Повторность каждого варианта опыта – трехкратная.

Содержание фотосинтетических пигментов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Dionex UltiMate 3000 (Thermo Fisher Scientific, Германия) [14–16]. Параметры фотохимической активности фотосистем (ФС) I и II измеряли с помощью измерительного комплекса Dual-PAM-100 (Heinz Walz, Германия) с модулем регистрации флуоресценции ФС II и двухволновым (830/875 нм) модулем регистрации сигнала первичного донора ФС I (P700) по стандартным протоколам [17]. Содержание водорастворимых фенольных соединений определяли спектрофотометрическим методом с реактивом Фолина – Чокальтеу в модификации V. L. Singleton и J. A. Rossi [18].

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel и пакета прикладных программ для статистического анализа. Проверку статистической значимости результатов исследования относительно контроля выполняли с помощью однофакторного дисперсионного анализа (One-Way ANOVA) с последующим применением пост-хок теста Тьюки (Tukey HSD). Изменения считали достоверными при следующих уровнях значимости: $^{*} - p \leq 0{,}05$; $^{**} - p \leq 0{,}01$; $^{***} - p \leq 0{,}001$ (табл. 1, 2; рисунок). Все диаграммы построены с помощью программы SigmaPlot 15.0.

Результаты и их обсуждение. Важным этапом перед введением в ЗСС фитогормонов является оценка потенциального влияния самой пленкообразующей основы на посевные качества семян. С этой целью был проведен модельный эксперимент, в котором семена были обработаны базовым пленкообразующим составом без добавления БС.

Полученные результаты не выявили статистически значимых различий между вариантами обработки базовым составом и контролем. Отсутствие негативного воздействия позволило заключить, что формирующаяся пленка может служить эффективной основой для создания ЗСС.

Анализ морфометрических показателей проростков сахарной свеклы выявил, что применение БС в составе ЗСС сопровождалось достоверной стимуляцией ростовых процессов (табл. 1). Длина надземной части проростков увеличилась на 32,2 % ($p < 0{,}01$) под действием ЗСС-БЛ и на 23,0 % ($p < 0{,}05$) – при обработке ЗСС-ЭБЛ относительно контроля. Длина корня также возросла на 10,5 и 24,1 % соответственно.

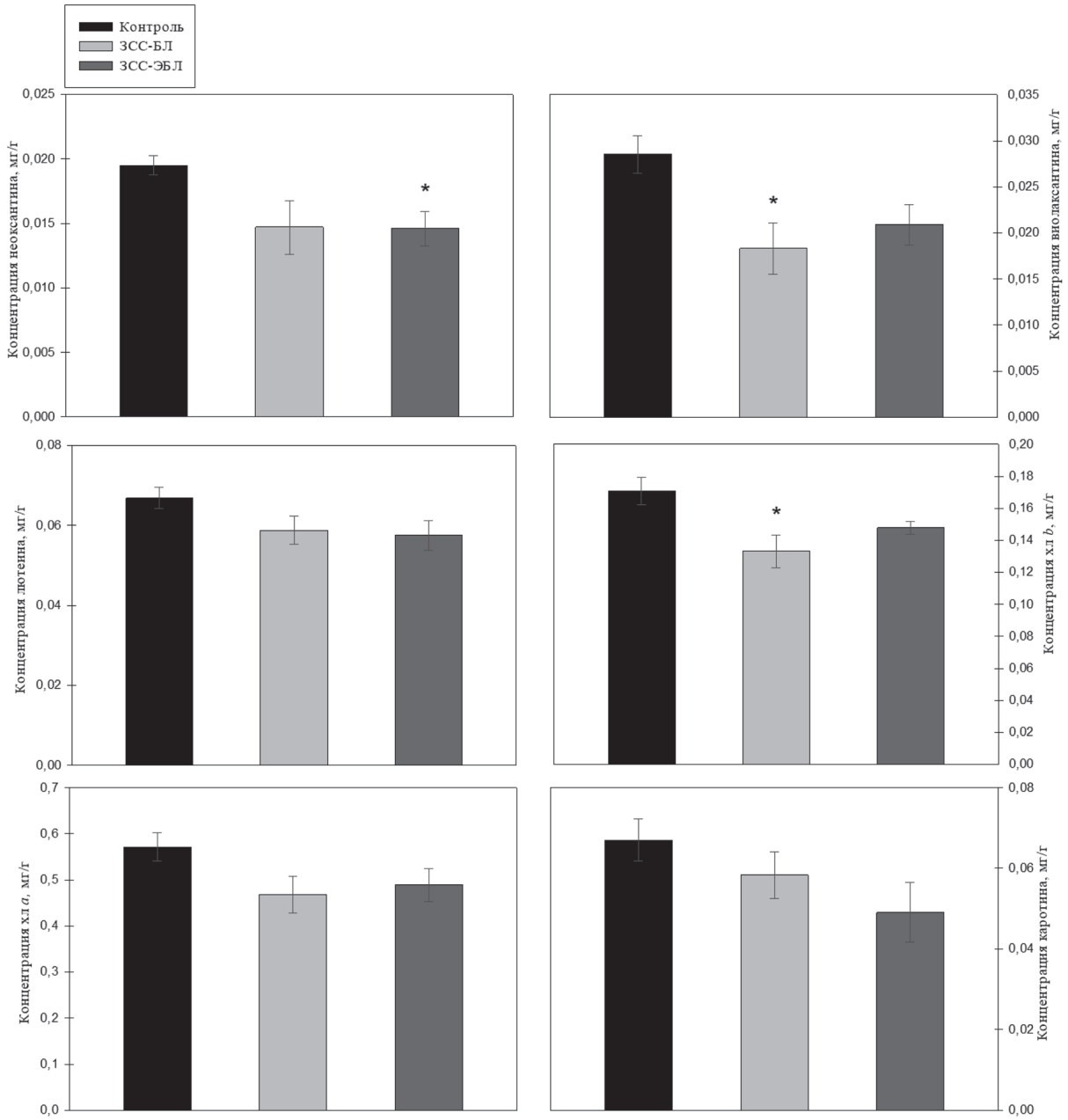
Таблица 1. **Влияние предпосевной обработки семян ЗСС на морфометрические показатели проростков сахарной свеклы сорта Каскад**

Table 1. **Effect of pre-sowing seed treatment with PSCs on morphometric parameters of sugar beet seedlings of the Cascade variety**

Вариант	Длина проростка, мм	Длина корня, мм	Масса проростка, г	Масса корня, г	Количество листьев, шт.
Контроль	97,33 ± 7,49	138,44 ± 16,64	1,57 ± 0,17	0,20 ± 0,03	5,11 ± 0,39
ЗСС-БЛ	128,57 ± 3,73**	152,86 ± 19,75	2,12 ± 0,50	0,28 ± 0,07	5,43 ± 0,30
ЗСС-ЭБЛ	119,67 ± 5,58*	171,67 ± 30,67	2,59 ± 0,16*	0,31 ± 0,09	5,5 ± 0,22

Наиболее выраженный эффект был отмечен по накоплению биомассы. Масса проростка сахарной свеклы возросла на 35 % в варианте с ЗСС-БЛ и на 65% ($p < 0{,}05$) – при обработке ЗСС-ЭБЛ. Аналогичная тенденция наблюдалась для массы корня, которая увеличилась на 40,1 % (ЗСС-БЛ) и 56,3 % (ЗСС-ЭБЛ).

Одним из основных маркеров устойчивости растений к абиотическим стрессам является стабильность и функциональная активность фотосинтетического аппарата. Предпосевная обработка семян регуляторами роста способна оказывать модифицирующее действие на фотосинтетический потенциал проростков, изменяя содержание и соотношение фотосинтетических пигментов, а также параметры фотохимической активности.



Влияние предпосевной обработки семян ЗСС на содержание основных фотосинтетических пигментов в листьях проростков сахарной свеклы (мг/г сырого вещества)

Effect of pre-sowing seed treatment with PSC on the content of major photosynthetic pigments in the leaves of sugar beet seedlings (mg/g fresh weight)

Методом ВЭЖХ проведен анализ содержания индивидуальных фотосинтетических пигментов в листьях 30-дневных проростков сахарной свеклы, семена которой подвергались предпосевной обработке ЗСС с БС [14–16].

Соответствующая обработка приводила к снижению концентрации всех исследованных пигментов, при этом эффект состава с БЛ был более выраженным, чем в варианте с ЭБЛ (рисунок). Наиболее существенное снижение содержания наблюдалось для пула хлорофиллов: под действием ЗСС-БЛ содержание хлорофиллов *a* и *b* уменьшилось на 18,0 и 22,2 % ($p < 0,05$), а при обработке ЗСС-ЭБЛ – на 14,4 и 13,5 % соответственно относительно контроля.

Содержание β-каротина в листьях проростков сахарной свеклы снижалось под действием ЗСС с БС на 13,4 % при обработке ЗСС-БЛ и на 26,9 % – при обработке ЗСС-ЭБЛ по сравнению

с контролем. Уровень неоксантина уменьшался на 25 % в обоих вариантах, однако статистически значимым это снижение было только при применении ЗСС-ЭБЛ ($p < 0,05$). Также зафиксировано достоверное уменьшение содержания виолаксантина и лютеина. Снижение содержания фотосинтетических пигментов в листьях может быть связано с опережающим ростом биомассы под влиянием БС или перераспределением метаболических ресурсов.

Предпосевная обработка существенно повлияла и на эффективность работы ФС I и II (табл. 2). Максимальная квантовая эффективность ФС II F_v/F_m повысилась с 0,761 (контроль) до 0,794 (ЗСС-БЛ) и 0,784 (ЗСС-ЭБЛ), что свидетельствует о сохранении высокого потенциала фотохимических реакций ввиду отсутствия повреждений в реакционном центре ФС II (P680) при обработках. Квантовая эффективность фотохимии ФС II *Y(II)* увеличилась на 61,8 % под действием ЗСС-БЛ и на 35,4 % – при обработке ЗСС-ЭБЛ, отражая интенсификацию линейного электронного транспорта. Существенное снижение квантового выхода нерегулируемых потерь *Y(NO)* (основной индикатор стресса) на 24,3 % ($p < 0,001$) (ЗСС-БЛ) и на 14,4 % ($p < 0,01$) (ЗСС-ЭБЛ) относительно контроля указывает на статистически достоверную минимизацию повреждений ФС II, падение доли пассивных потерь энергии и повышение адаптивных возможностей фотосинтетического аппарата.

Таблица 2. **Влияние предпосевной обработки семян ЗСС на фотохимические параметры фотосинтетического аппарата проростков сахарной свеклы**

Table 2. **Effect of pre-sowing seed treatment with PSCs on photochemical parameters of the photosynthetic apparatus of sugar beet seedlings**

Параметр	Контроль	ЗСС-БЛ	ЗСС-ЭБЛ
F_v/F_m	0,761 ± 0,041	0,794 ± 0,011	0,784 ± 0,011
Y(II)	0,144 ± 0,025	0,233 ± 0,028	0,195 ± 0,030
Y(NO)	0,688 ± 0,015	0,521 ± 0,033***	0,589 ± 0,030**
Y(NPQ)	0,168 ± 0,016	0,246 ± 0,016**	0,216 ± 0,009*
NPQ	0,236 ± 0,023	0,472 ± 0,047***	0,358 ± 0,026**
Y(I)	0,230 ± 0,017	0,331 ± 0,023**	0,292 ± 0,024*
Y(ND)	0,529 ± 0,018	0,478 ± 0,018	0,476 ± 0,015*
Y(NA)	0,241 ± 0,027	0,191 ± 0,015	0,232 ± 0,015
ETR(I)	22,93 ± 1,741	32,94 ± 2,270**	29,07 ± 2,390*

Активизация защитных механизмов подтверждена ростом регулируемого нефотохимического тушения *Y(NPQ)* на 46,4 % ($p < 0,01$) и коэффициента *NPQ* в 2 раза ($p < 0,001$) при обработке ЗСС-БЛ, обеспечив эффективную термическую диссипацию избыточной световой энергии. При обработке ЗСС-ЭБЛ отмечается аналогичная тенденция: увеличение регулируемого нефотохимического тушения *Y(NPQ)* на 28,6 % ($p < 0,05$) и коэффициента *NPQ* на 51,7 % ($p < 0,01$) также указывает на активацию механизмов тепловой диссипации. Однако выраженность данного эффекта была ниже по сравнению с вариантом ЗСС-БЛ, что свидетельствует о менее интенсивной реализации фотозащитных процессов.

Сходные изменения отмечены и для ФС I: увеличение квантового выхода *Y(I)* на 43,9 % ($p < 0,01$) при обработке ЗСС-БЛ и на 27,0 % ($p < 0,05$) – при ЗСС-ЭБЛ, а также скорости электронного транспорта *ETR(I)* на 43,7 % ($p < 0,01$) и 26,8 % ($p < 0,05$) соответственно по сравнению с контролем указывает на активацию электронтранспортной цепи и повышение эффективности фотохимических процессов. Снижение *Y(ND)* примерно на 10 % в обоих вариантах обработки может свидетельствовать об улучшении донорного обеспечения ФС I, тогда как уменьшение *Y(NA)*, особенно выраженное при обработке ЗСС-БЛ (на 20,8 %), отражает ослабление ограничений на акцепторной стороне.

На первый взгляд, снижение концентрации фотосинтетических пигментов противоречит наблюдаемой активации фотохимической активности ФС I и II. Это явление может быть объяснено двумя взаимосвязанными причинами. Во-первых, стимуляция ростовых процессов БС может опережать накопление элементов пигментного комплекса: масса листа увеличивается быстрее, чем в нем синтезируются новые хлорофиллы и каротиноиды, что закономерно снижает

их концентрацию. Во-вторых, и это физиологически более значимо, БС способны повышать эффективность работы пигментного аппарата за счет оптимизации структуры тилакоидных мембран и ускорения транспорта электронов [19]. Данные PAM-флуориметрии подтверждают это: значительное снижение нерегулируемых потерь энергии при одновременном росте эффективности ФС II свидетельствует о том, что фотосинтетический аппарат сохраняет высокую продуктивность даже на фоне сниженной концентрации пигментов.

Важным дополнением к оценке физиолого-биохимического состояния проростков является анализ содержания фенольных соединений, которые участвуют в антиоксидантной защите растений и могут служить маркером ответа на стресс. В связи с этим представляло интерес выяснить, влияет ли предпосевная обработка семян БС на накопление водорастворимых фенолов в листьях сахарной свеклы.

Проведенный анализ показал, что содержание водорастворимых фенольных соединений в проростках сахарной свеклы в целом изменялось незначительно под влиянием предпосевной обработки ЗСС. Различия между вариантами практически отсутствовали: значения в опытных вариантах совпадали с уровнем контроля. Отсутствие увеличения концентрации фенолов дополнительно указывает на то, что обработка ЗСС с БС не индуцирует стрессовых реакций у данной культуры.

Заключение. У проростков сахарной свеклы сорта Каскад наблюдается согласованное усиление ростовых и фотосинтетических процессов под действием обоих составов. Существенное увеличение массы и длины надземной части согласуется с известным действием БС как активаторов растяжения и деления клеток.

Различия в действии двух ЗСС носят количественный, а не качественный характер. Более выраженная активация фотопротекторных механизмов под действием ЗСС-БЛ (двукратный рост *NPQ*) обеспечивает поддержание функциональной стабильности фотосинтетического аппарата при возможных стрессовых воздействиях. В тех случаях, когда целью обработки является повышение продуктивности, предпочтение следует отдавать ЗСС-ЭБЛ, так как он обеспечивает наибольший прирост биомассы при меньшем воздействии на пигментный комплекс. Такая дифференциация эффектов, вероятно, связана с различной скоростью метаболизма и стабильностью структур БС в растительных тканях.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. FAOSTAT. Crops and livestock products // Food and Agriculture Organization of the United Nations. – 2022. – URL: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (date of access: 24.03.2026).

2. Zhang, Y. OMICS Technologies and Applications in Sugar Beet / Y. Zhang, J. Nan, B. Yu // Frontiers in Plant Science. – 2016. – Vol. 7. – Art. 900. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00900

3. Lange, W. Taxonomy and cultonomy of beet (*Beta vulgaris* L.) / W. Lange, W. A. Brandenburg, T. S. M. De Block // Botanical Journal of the Linnean Society. – 1999. – Vol. 130, N 1. – P. 81–96. https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1999.tb00785.x

4. Ober, E. S. Abiotic Stress in Sugar Beet / E. S. Ober, A. Rajabi // Sugar Tech. – 2010. – Vol. 12, N 3–4. – P. 294–298. https://doi.org/10.1007/s12355-010-0035-3

5. Jaggard, K. W. The relative effects of drought stress and virus yellows on the yield of sugarbeet in the UK, 1980–95 / K. W. Jaggard, A. M. Dewar, J. D. Pidgeon // The Journal of Agricultural Science. – 1998. – Vol. 130, N 3. – P. 337–343. https://doi.org/10.1017/s0021859698005371

6. Hoffmann, C. M. Sucrose Accumulation in Sugar Beet Under Drought Stress / C. M. Hoffmann // Journal of Agronomy and Crop Science. – 2010. – Vol. 196, N 4. – P. 243–252. https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2009.00415.x

7. Finch-Savage, W. E. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation / W. E. Finch-Savage, G. W. Bassel // Journal of Experimental Botany. – 2016. – Vol. 67, N 3. – P. 567–591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490

8. Chaves, M. M. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell / M. M. Chaves, J. Flexas, C. Pinheiro // Annals of Botany. – 2009. – Vol. 103, N 4. – P. 551–560. https://doi.org/10.1093/aob/mcn125

9. Lawlor, D. W. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants / D. W. Lawlor, G. Cornic // Plant, Cell and Environment. – 2002. – Vol. 25, N 2. – P. 275–294. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x

10. Murchie, E. H. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications / E. H. Murchie, T. Lawson // Journal of Experimental Botany. – 2013. – Vol. 64, N 13. – P. 3983–3998. https://doi.org/10.1093/jxb/ert208

11. Emerging roles of plant growth regulators for plants adaptation to abiotic stress–induced oxidative stress / A. Hossain, B. Pamanick, V. K. Venugopalan [et al.] // Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture. Roles in Stress Tolerance / eds.: T. Aftab, M. Naeem. – London; San Diego, 2022. – P. 1–72. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91005-7.00010-2

12. Bajguz, A. Brassinosteroids – occurrence and chemical structures in plants / A. Bajguz // Brassinosteroids: A Class of Plant Hormone / eds. S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht, 2011. – P. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0189-2_1

13. Divi, U. K. Brassinosteroid: a biotechnological target for enhancing crop yield and stress tolerance / U. K. Divi, P. Krishna // New Biotechnology. – 2009. – Vol. 26, N 3–4. – P. 131–136. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2009.07.006

14. Rodriguez-Amaya, D. B. HarvestPlus handbook for carotenoid analysis / D. B. Rodriguez-Amaya, M. Kimura. – Washington: HarvestPlus, 2004. – 63 p.

15. The Identification of Chlorophyll and Its Derivatives in The Pigment Mixtures: HPLC-Chromatography, Visible and Mass Spectroscopy Studies / S. M. Milenković, J. B. Zvezdanović, T. D. Anđelković, D. Z. Marković // Advanced Technologies. – 2012. – Vol. 1, N 1. – P. 16–24.

16. Forni, E. HPLC separation and fluorimetric estimation of chlorophylls and pheophytins in fresh and frozen peas / E. Forni, M. Ghezzi, A. Polesello // Chromatography. – 1988. – Vol. 26, N 1. – P. 120–124. https://doi.org/10.1007/BF02268135

17. Dual-PAM-100 Measuring system for simultaneous assessment of p700 and chlorophyll fluorescence // Walz. – URL: https://www.walz.com/downloads/?filter=dual-pam-100 (date of access: 10.08.2026).

18. Singleton, V. L. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents / V. L. Singleton, J. A. Rossi // American Journal of Enology and Viticulture. – 1965. – Vol. 16. – P. 144–158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

19. Holá, D. Brassinosteroids and primary photosynthetic processes / D. Holá // Brassinosteroids in Plant Developmental Biology and Stress Tolerance / eds.: G. J. Ahammed, A. Sharma, J. Yu. – London, 2022. – Ch. 4. – P. 59–104. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813227-2.00015-1

References

1. FAOSTAT. Crops and livestock products. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2022. Avaliable at: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (accessed 24.03.2026).

2. Zhang Y., Nan J., Yu B. OMICS Technologies and Applications in Sugar Beet. *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, art. 900. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00900

3. Lange W., Brandenburg W. A., De Block T. S. M. Taxonomy and cultonomy of beet (*Beta vulgaris* L.). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1999, vol. 130, no. 1, pp. 81–96. https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1999.tb00785.x

4. Ober E. S., Rajabi A. Abiotic Stress in Sugar Beet. *Sugar Tech*, 2010, vol. 12, no. 3–4, pp. 294–298. https://doi.org/10.1007/s12355-010-0035-3

5. Jaggard K. W., Dewar A. M., Pidgeon J. D. The relative effects of drought stress and virus yellows on the yield of sugarbeet in the UK, 1980–95. *The Journal of Agricultural Science*, 1998, vol. 130, no. 3, pp. 337–343. https://doi.org/10.1017/s0021859698005371

6. Hoffmann C. M. Sucrose Accumulation in Sugar Beet Under Drought Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2010, vol. 196, no. 4, pp. 243–252. https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2009.00415.x

7. Finch-Savage W. E., Bassel G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 2016, vol. 67, no. 3, pp. 567–591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490

8. Chaves M. M., Flexas J., Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 2009, vol. 103, no. 4, pp. 551–560. https://doi.org/10.1093/aob/mcn125

9. Lawlor D. W., Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell ad Environment*, 2002, vol. 25, no. 2, pp. 275–294. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x

10. Murchie E. H., Lawson T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 2013, vol. 64, no. 13, pp. 3983–3998. https://doi.org/10.1093/jxb/ert208

11. Hossain A., Pamanick B., Venugopalan V. K., Ibrahimova U., Rahman Md. A., Siyal A. L., Maitra S., Chatterjee S., Aftab T. Emerging roles of plant growth regulators for plants adaptation to abiotic stress–induced oxidative stress. *Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture. Roles in Stress Tolerance.* London; San Diego, 2022, pp. 1–72. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91005-7.00010-2

12. Bajguz A. Brassinosteroids – occurrence and chemical structures in plants. *Brassinosteroids: A Class of Plant Hormone*. Dordrecht, 2011, pp. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0189-2_1

13. Divi U. K., Krishna P. Brassinosteroid: a biotechnological target for enhancing crop yield and stress tolerance. *New Biotechnology*, 2009, vol. 26, no. 3–4, pp. 131–136. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2009.07.006

14. Rodriguez-Amaya D. B., Kimura M. *HarvestPlus handbook for carotenoid analysis*. Washington: HarvestPlus, 2004. 63 p.

15. Milenković S. M., Zvezdanović J. B., Anđelković T. D., Marković D. Z. The Identification of Chlorophyll and Its Derivatives in The Pigment Mixtures: HPLC-Chromatography, Visible and Mass Spectroscopy Studies. *Advanced technologies*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 16–24.

16. Forni E., Ghezzi M., Polesello A. HPLC separation and fluorimetric estimation of chlorophylls and pheophytins in fresh and frozen peas. *Chromatography*, 1988, vol. 26, no. 1, pp. 120–124. https://doi.org/10.1007/BF02268135

17. Dual-PAM-100 Measuring system for simultaneous assessment of p700 and chlorophyll fluorescence. Walz. Avaliable at: https://www.walz.com/downloads/?filter=dual-pam-100 (accessed 10.08.2026).

18. Singleton V. L., Rossi J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 1965, vol. 16, pp. 144–158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

19. Holá D. Brassinosteroids and primary photosynthetic processes. *Brassinosteroids in Plant Developmental Biology and Stress Tolerance*. London, 2022, pp. 59–104. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813227-2.00015-1

Информация об авторах

Боровик Анастасия Александровна – мл. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nastyaminskaya37@gmail.com

Небышинец Полина Алексеевна – науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: polinanebyshinets@yandex.by

Самович Татьяна Викторовна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: samovich77@gmail.com

Ламан Николай Афанасьевич – академик, д-р биол. наук, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikolai.laman@gmail.com

Information about the authors

Anastasiya A. Borovik – Junior Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nastyaminskaya37@gmail.com

Polina A. Nebyshinets – Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: polinanebyshinets@yandex.by

Tatsiana V. Samovich – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: samovich77@gmail.com

Nikolai A. Laman – Academician, D. Sc. (Biol.), Head of the Laboratory. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolai.laman@gmail.com