

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 577.175.1: 57.085
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2022-67-2-181-189>

Поступила в редакцию 14.12.2021
Received 14.12.2021

Я. В. Хомюк¹, Р. П. Литвиновская², А. П. Колбас¹

¹Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Республика Беларусь

²Институт биоорганической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ЭПИБРАССИНОЛИДА И ЕГО ЭФИРОВ С СЕРНОЙ КИСЛОТОЙ НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОДСОЛНЕЧНИКА *HELIANTHUS ANNUUS* L. СОРТА ГЕЛИОС

Аннотация. Проведено поэтапное исследование биологической активности 24-эпибрассинолида (ЭБ) и его натриевых солей эфиров с серной кислотой (натрий 2-, 3-, 22- и 23-моносulfаты и динатрий 2,3-дисulfат ЭБ) в опытах по влиянию на ростовые параметры и урожайность подсолнечника однолетнего *Helianthus annuus* L. (сорт Гелиос) в зависимости от условий выращивания.

В опытах на беспочвенной среде действие sulfатов ЭБ на рост и развитие растений в концентрации 10^{-11} – 10^{-9} М оказалось незначительным (за исключением динатрий 2,3-дисulfата ЭБ), в большей степени активность изученных соединений проявилась в лабораторном опыте в почвенной культуре. Наибольшее влияние на рост и развитие отмечено в условиях полевых опытов. Показано, что наиболее эффективным и универсальным эфиром по исследуемым параметрам для двух типов обработки (замачивание семян и опрыскивание растений) является динатрий 2,3-дисulfат ЭБ.

Ключевые слова: *Helianthus annuus* L., брассиностероиды, 24-эпибрассинолид, эфиры ЭБ с серной кислотой, ростстимулирующая активность, урожайность

Для цитирования: Хомюк, Я. В. Влияние эпибрассинолида и его эфиров с серной кислотой на морфометрические параметры подсолнечника *Helianthus annuus* L. сорта Гелиос / Я. В. Хомюк, Р. П. Литвиновская, А. П. Колбас // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2022. – Т. 67, № 2. – С. 181–189. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2022-67-2-181-189>

Yana V. Khamiuk¹, Raisa P. Litvinovskaya², Aliaksandr P. Kolbas¹

¹Brest State A. Pushkin University, Brest, Republic of Belarus

²Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

THE EFFECT OF EPIBRASSINOLIDE AND ITS SULFURIC ACID ESTERS ON THE MORPHOMETRIC PARAMETERS OF SUNFLOWER *HELIANTHUS ANNUUS* L. (cv. HELIOS)

Abstract. A step-by-step study of the biological activity of 24-epibrassinolide (EB) and its sodium salts of esters with sulfuric acid (sodium 2-, 3-, 22- and 23-monosulfates and disodium 2.3-disulfate EB) was carried out in experiments on the effect on the growth parameters and crop yield of annual sunflower *Helianthus annuus* L. (Helios variety) depending on growing conditions.

In experiments on a groundless medium, the effect of epibrassinolide sulfuric acid esters on primary plant growth at concentrations of 10^{-11} – 10^{-9} M turned out to be insignificant (with the exception of disodium 2.3-disulfate EB), to a greater extent the activity of the studied compounds was marked in laboratory experiment in soil culture. The greatest effect on growth and development plant was noted in field experiments. It is shown that the most effective and universal compound according to the studied parameters for two types of treatment (soaking seeds and spraying plants) is disodium 2.3-disulfate EB.

Keywords: *Helianthus annuus* L., brassinosteroids, 24-epibrassinolide, esters of EB with sulfuric acid, growth stimulating activity, crop yield

For citation: Khamiuk Ya. V., Litvinovskaya R. P., Kolbas A. P. The effect of epibrassinolide and its sulfuric acid esters on the morphometric parameters of sunflower *Helianthus annuus* L. (cv. Helios). *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 181–189 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2022-67-2-181-189>

Введение. Наблюдаемые тенденции в изменении климата указывают на усиление экстремальных условий при возделывании сельскохозяйственных культур, в связи с чем возникает острая необходимость в применении вспомогательных адаптогенных средств. Одним из таких подходов является применение экологически безопасных веществ – брассиностероидов (БС), которые

в малых дозировках обладают физиологическими эффектами на растения на разных фазах развития, благоприятно воздействуя на них в условиях биотического и абиотического стресса [1]. Подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) является одной из основных масличных культур в мире. В последние годы на территории Белорусского Полесья [2] стало возможным выращивание этой перспективной для Республики Беларусь культуры. Одним из подходящих сортов для возделывания является районированный масличный раннеспелый сорт Гелиос.

Ранее проведенные немногочисленные лабораторные исследования показали, что в условиях негативного воздействия на подсолнечник потенциально токсичных металлов, хлоридного засоления и других абиотических и биотических стресс-факторов окружающей среды защитное действие оказывает эпибрассинолид (ЭБ) [3–5]. Однако биологическое действие его метаболитов до настоящего времени не изучалось. Одним из метаболических превращений БС считается их сульфатирование сульфотрансферазами [6], которое предполагает инактивацию БС [7] или, наоборот, является необходимым этапом для проявления биологического эффекта [8]. В связи с этим интересным представлялось изучение биологической активности ряда сульфопроизводных соединений ЭБ, у которых гидроксильные группы в различных положениях фитогормона защищены в виде сложных эфиров.

Целью исследования являлось изучение рострегулирующего действия эпибрассинолида и его производных с серной кислотой в наиболее эффективных концентрациях на ростовые показатели и урожайность подсолнечника однолетнего.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи: 1) определить наиболее активные вещества и их концентрации в различных типах опытов; 2) определить наиболее эффективный способ внесения ЭБ и его производных для продуктивного использования их в лабораторных и полевых условиях; 3) оценить изменение ростовых параметров подсолнечника под действием ЭБ и его сульфопроизводных в лабораторных и полевых условиях; 4) оценить изменение урожайности подсолнечника под действием исследуемых соединений.

Материалы и методы исследования. 24-ЭБ, его натриевые соли 2-, 3-, 22- и 23-моносulfатов и 2,3-дисulfата ЭБ (конъюгаты) синтезированы в лаборатории химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси [9].

Семена подсолнечника однолетнего (сорт Гелиос) предоставлены Республиканским научным дочерним унитарным предприятием «Полесский институт растениеводства» (г. Мозырь).

Определение эффективных концентраций ЭБ и его эфиров с серной кислотой, а также воздействия их на всхожесть семян и длину проростков подсолнечника однолетнего в лабораторных условиях. Изучение морфометрических параметров подсолнечника проводили, согласно ГОСТ 12038–84 [10], в термостате при 25 °С в темноте, с фиксированием параметров энергии прорастания и всхожести семян, длины подземной и надземной частей подсолнечника [11]. Обработку исследуемыми веществами осуществляли однократно в виде замачивания семян на 5 ч, а затем проращивали на фильтровальной бумаге. По истечении 3 сут определяли энергию прорастания семян, через 5 сут – всхожесть, среднюю длину корней и гипокотилей проростков. Изучен диапазон наиболее характерных для БС концентраций: 10^{-11} , 10^{-10} , 10^{-9} М.

В результате проведенных опытов были отобраны наиболее эффективные концентрации ЭБ и каждого из его сульфатов для дальнейших исследований.

Определение воздействия ЭБ и его эфиров с серной кислотой на подсолнечник однолетний в вегетационном лабораторном эксперименте при различных способах обработки. При предпосевной обработке семена замачивали в растворах ЭБ и его сульфатов на 5 ч, после чего высаживали в пластиковые контейнеры размером 9×9×10 см на универсальный почвогрунт («Хозяин, Карио», РБ, в состав которого входили: азот общий – 5795 мг/кг, калий общий – 3223 мг/кг, фосфор общий – 1838 мг/кг, Cu – 6,15 мкг/кг, Zn – 24 мкг/кг) и выращивали в лабораторных условиях [12, 13] в течение месяца.

При внекорневой обработке семена высаживали в контейнеры без предварительной обработки. Внекорневую обработку путем опрыскивания растений исследуемыми соединениями проводили дважды – на стадии всходов растений (10-е сутки) и на стадии второй пары настоящих листьев (16-е сутки). Временные рамки при выращивании подсолнечника в условиях лабораторного вегетационного опыта были установлены нами опытным путем. В качестве контроля использовали

растения, обработанные дистиллированной водой. Фиксировали значения длины подземной и надземной частей подсолнечника однолетнего.

Определение воздействия ЭБ и его эфиров с серной кислотой на подсолнечник однолетний в полевом эксперименте при различных способах обработки. Исследование в полевых условиях проводили на экспериментальном участке отдела агробиологии Центра экологии (г. Брест) с определенным составом почвы (азот общий – 0,058 %, калий – 82 мг/кг, фосфор – 355,81 мг/кг, Рb – 13,4 мкг/кг, Cu – 10,1 мкг/кг, Zn – 86,2 мкг/кг, Ni – 3,9 мкг/кг, Mn – 113,3 мкг/кг).

Обработку исследуемыми веществами проводили аналогично вегетационному лабораторному опыту (замачивание семян при предпосевной обработке и двукратное опрыскивание растений при внекорневой обработке). Внесение исследуемых веществ при внекорневой обработке осуществляли на стадии сформированной второй пары настоящих листьев (для увеличения способности конкурировать с сорными растениями на начальных этапах роста) и в стадии бутонизации (для наиболее эффективного воздействия на цветение и образование семян). В данных условиях фиксировали значения длины стеблей, массы сухих стеблей с листьями, корзинок с семенами, массы семян подсолнечника.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Microsoft Excel и *t*-критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждение. Результаты лабораторного опыта по подбору оптимальных концентраций тестируемых веществ показали (см. таблицу), что наибольший положительный эффект относительно контроля на среднюю длину подземной части (корней) оказывают ЭБ в концентрациях 10^{-9} М ($p \leq 0,1$) (увеличение на 22,1 %), динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрациях 10^{-11} М ($p \leq 0,05$) и 10^{-9} М (увеличение на 32,9 и 18,4 % соответственно). Положительное влияние оказали также ЭБ в концентрациях 10^{-10} М, натрий 2-моносульфат ЭБ в концентрациях 10^{-10} и 10^{-9} М, натрий 3-моносульфат ЭБ в концентрации 10^{-11} М (увеличение на 10,6; 6,0; 3,3 и 7,5 % соответственно). Относительно ЭБ наиболее выраженное положительное действие оказывал динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-11} М (увеличение длины корня на 44,4 %) (рис. 1).

Влияние ЭБ и его сульфатов на среднюю длину корней и побегов подсолнечника в лабораторных условиях на беспочвенной среде

Effect of EB and its sulfates on the average length of sunflower roots and shoots in laboratory conditions

Вариант обработки	Средняя длина, см	
	подземной части	надземной части
К	1,84 ± 0,12	0,94 ± 0,07
ЭБ 10^{-11}	1,69 ± 0,17	0,73 ± 0,06
ЭБ 10^{-10}	2,03 ± 0,15	0,99 ± 0,05
ЭБ 10^{-9}	2,25 ± 0,15	0,98 ± 0,05
2-нс 10^{-11}	1,54 ± 0,17	0,78 ± 0,09
2-нс 10^{-10}	1,95 ± 0,17	1,02 ± 0,11
2-нс 10^{-9}	1,90 ± 0,19	0,80 ± 0,04
2,3-дндс 10^{-11}	2,44 ± 0,21	1,05 ± 0,10
2,3-дндс 10^{-10}	1,74 ± 0,18	0,78 ± 0,06
2,3-дндс 10^{-9}	2,18 ± 0,19	1,14 ± 0,11
3-нс 10^{-11}	1,98 ± 0,21	0,96 ± 0,08
3-нс 10^{-10}	1,72 ± 0,16	0,71 ± 0,07
3-нс 10^{-9}	1,76 ± 0,15	0,86 ± 0,09
22-нс 10^{-11}	1,66 ± 0,17	0,96 ± 0,08
22-нс 10^{-10}	1,85 ± 0,19	0,86 ± 0,07
22-нс 10^{-9}	1,86 ± 0,18	0,88 ± 0,10
23-нс 10^{-11}	1,53 ± 0,17	0,77 ± 0,08
23-нс 10^{-10}	1,84 ± 0,14	1,01 ± 0,10
23-нс 10^{-9}	1,60 ± 0,12	0,88 ± 0,10

Примечание. 2-, 3-, 22-, 23-нс – натрий 2-, 3-, 22-, 23-моносульфат 24-ЭБ, 2,3-дндс – динатрий 2,3-дисульфат 24-ЭБ.

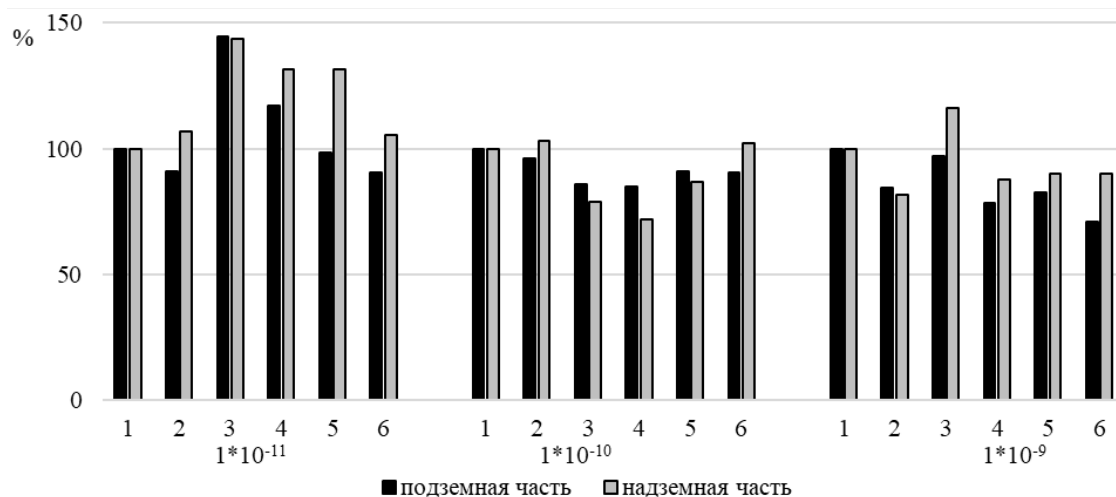


Рис. 1. Влияние эфиров ЭБ с серной кислотой на среднюю длину подсолнечника, выращенного в результате вегетационного опыта в лабораторных условиях (относительно ЭБ). 1 – ЭБ, 2 – 2-нс ЭБ, 3 – 2,3-дндс ЭБ, 4 – 3-нс ЭБ, 5 – 22-нс ЭБ, 6 – 23-нс ЭБ

Fig. 1. The effect of esters EB on the average length of sunflower grown as a result of a growing experiment in laboratory conditions in relation to EB. 1 – EB, 2 – 2-ss EB, 3 – 2.3-dsds EB, 4 – 3-ns EB, 5 – 22-ss EB, 6 – 23-ss EB

На величину средней длины надземной части (гипокотилей) подсолнечника наибольший положительный эффект относительно контроля оказали динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрациях 10^{-11} М ($p \leq 0,05$) и 10^{-9} М (увеличение на 11,2 и 21,2 %). Положительное влияние оказали также ЭБ в концентрациях 10^{-10} и 10^{-9} М (увеличение на 5,0 и 3,4 %), натрий 2-моносulfат ЭБ в концентрации 10^{-10} М (увеличение на 7,6 %) и натрий 23-моносulfат ЭБ в концентрации 10^{-10} М (увеличение на 6,5 %). Относительно ЭБ наиболее выраженное положительное действие оказывал динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрациях 10^{-11} и 10^{-9} М (увеличение на 43,8 и 16,3 %), натрий 3-моносulfат ЭБ в концентрации 10^{-11} М (увеличение на 31,5 %), натрий 22-моносulfат ЭБ в концентрации 10^{-11} М (увеличение на 31,5 %).

По результатам лабораторного опыта можно сделать вывод, что сульфопроизводные 24-ЭБ в концентрациях 10^{-10} и 10^{-9} М в основном проявляют более низкую активность по отношению к ЭБ, но в ряде случаев в концентрации 10^{-11} М оказывают положительное воздействие на ростовые параметры проростков подсолнечника на начальных этапах роста и развития. Наиболее выраженную активность как относительно контроля, так и относительно ЭБ проявляет динатрий 2,3-дисульфат ЭБ.

Вегетационный лабораторный эксперимент. По итогам лабораторных опытов в беспочвенной среде отобраны наиболее активные вещества (ЭБ, 2,3-дисульфо, 3- и 23-сульфопроизводные ЭБ) и эффективные концентрации для следующего этапа исследования, на котором изучалось их влияние на морфометрические параметры подсолнечника в лабораторном вегетационном эксперименте в почвенной культуре.

При предпосевной обработке зафиксировано (рис. 2) повышение двух ростовых параметров – средней длины подземной и надземной частей растения относительно контроля для 2,3-дисульфата ЭБ в концентрациях 10^{-11} М (увеличение по 13,5 %) и 10^{-9} М (увеличение на 37,8 и 31,4 %, $p \leq 0,1$), а также для 23-моносulfата ЭБ в концентрации 10^{-10} М (увеличение на 35,1 и 19,9 %, $p \leq 0,1$). Положительное воздействие по одному исследованному параметру относительно контроля зафиксировано для длины подземной части при воздействии ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 13,5 %) и 2-моносulfата ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 10,8 %), а также для длины надземной части при воздействии 3-моносulfата ЭБ в концентрации 10^{-11} М (увеличение на 12,2 %). Относительно ЭБ наиболее выраженное влияние на длину подземной и надземной частей оказывает динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 21,4 и 30,6 %).

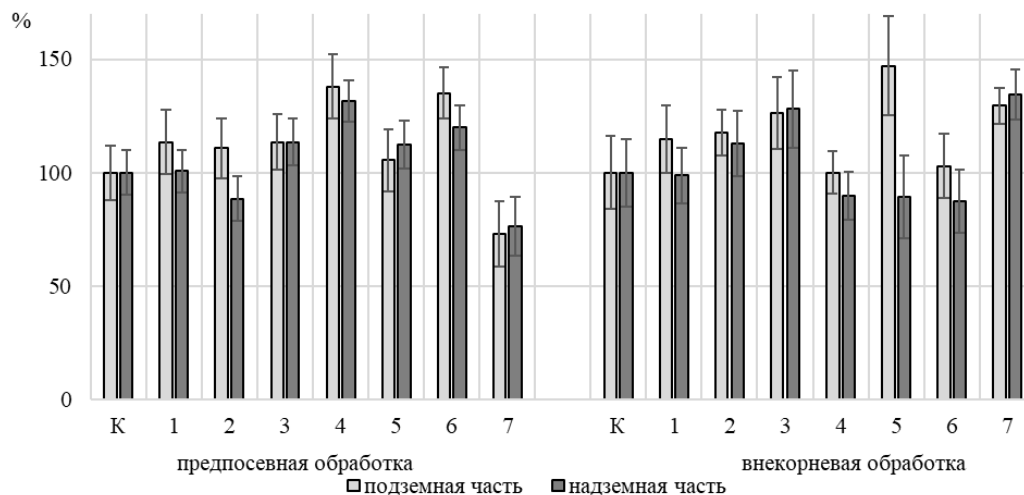


Рис. 2. Влияние ЭБ и его эфиров с серной кислотой на среднюю длину подсолнечника, выращенного в результате вегетационного опыта в лабораторных условиях. К – контроль, 1 – ЭБ в концентрации 10^{-9} М; 2 – 2-нс ЭБ в концентрации 10^{-9} М; 3, 4 – 2,3-дндс ЭБ в концентрациях 10^{-11} и 10^{-9} М; 5 – 3-нс ЭБ 10^{-11} М; 6, 7 – 23-нс ЭБ в концентрациях 10^{-10} и 10^{-9} М

Fig. 2. The effect of EB and its esters on the average length of sunflower grown as a result of a growing experiment in laboratory conditions. K – control, 1 – EB at a concentration of 10^{-9} M; 2 – 2-ns EB at a concentration of 10^{-9} M; 3, 4 – 2,3-dnds EB at concentrations of 10^{-11} and 10^{-9} M; 5 – 3-ns EB 10^{-11} M; 6, 7 – 23-ns EB at concentrations of 10^{-10} and 10^{-9} M

При внекорневой обработке растений отмечено повышение двух ростовых параметров относительно контроля для 2-моносульфата ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 17,6 и 12,7 %), 2,3-дисульфата ЭБ в концентрации 10^{-11} М (увеличение на 26,5 и 28,0 %) и 23-моносульфата ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 29,4 и 34,4 %). Положительное воздействие по одному исследованному параметру относительно контроля зафиксировано для длины подземной части для ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 14,7 %) и для 3-моносульфата ЭБ в концентрации 10^{-11} М (увеличение на 47,1 %). Относительно ЭБ наиболее выраженное влияние на длину подземной и надземной частей оказывает натрий 23-моносульфат ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 12,8 и 36,1 %).

В ряде опытов отмечено подавление роста растений под действием сульфатов. Так, для 23-сульфопроизводного в концентрации 10^{-9} М наблюдалось значительное понижение роста как подземной, так и надземной части растений подсолнечника относительно контроля (35,7 и 24,2 %) при предпосевной обработке. Как и в лабораторном опыте на беспочвенной среде, 2,3-дисульфопроизводное показало лучшие результаты, достоверно стимулируя рост подсолнечника в концентрациях 10^{-11} и 10^{-9} М по сравнению с контролем и ЭБ.

Полевой эксперимент. По результатам вегетационного лабораторного опыта по влиянию ЭБ и его эфиров с серной кислотой в почвенной культуре были заложены опыты в полевых условиях. Оценивали следующие параметры подсолнечника: полевую всхожесть семян, сохранность (долю растений в конце вегетационного периода по отношению к взошедшим), высоту надземной части, биомассу зеленых частей растения и урожайность семян.

В сравнении с результатами, полученными в лабораторном эксперименте, полевая всхожесть семян закономерно понижалась при предпосевной обработке, что может быть связано с торможением развития зародыша семени в естественной среде (рис. 3). Отмечено, что в полевых опытах в большинстве вариантов при предпосевной обработке семян изучаемыми соединениями возшло больше растений (по сравнению с контролем), а сохранилось и развилось больше при внекорневой обработке практически во всех случаях, что может быть связано с внесением веществ в двух фазах созревания растений.

К концу вегетационного периода эффект от воздействия предпосевной обработки семян ЭБ и его сульфатами на ростовые показатели растений нивелировался (рис. 4). В то же время при внекорневой обработке зафиксировано повышение роста растений для всех изученных соединений.

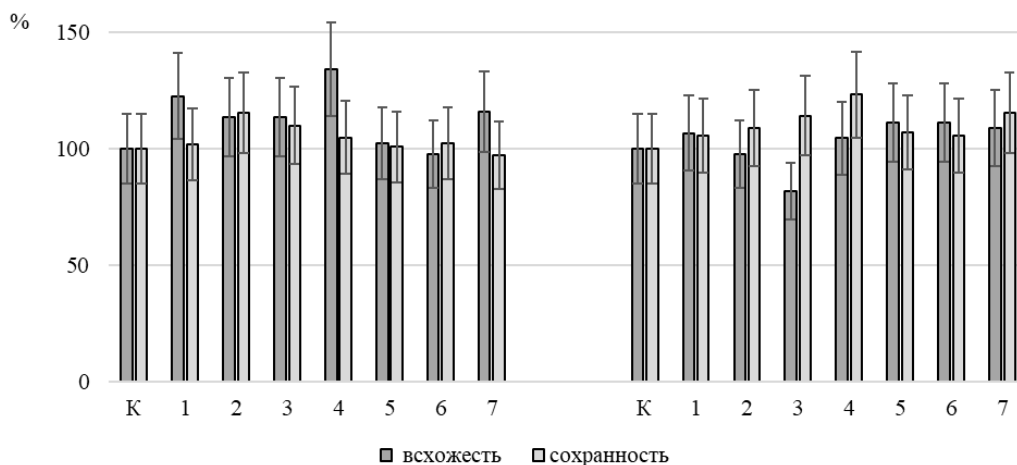


Рис. 3. Влияние ЭБ и его эфиров с серной кислотой на всхожесть и сохранность подсолнечника однолетнего в полевых условиях. Обозначения как на рис. 2

Fig. 3. The effect of EB and its esters on the germination and preservation of annual sunflower in the field. Notation as in Fig. 2

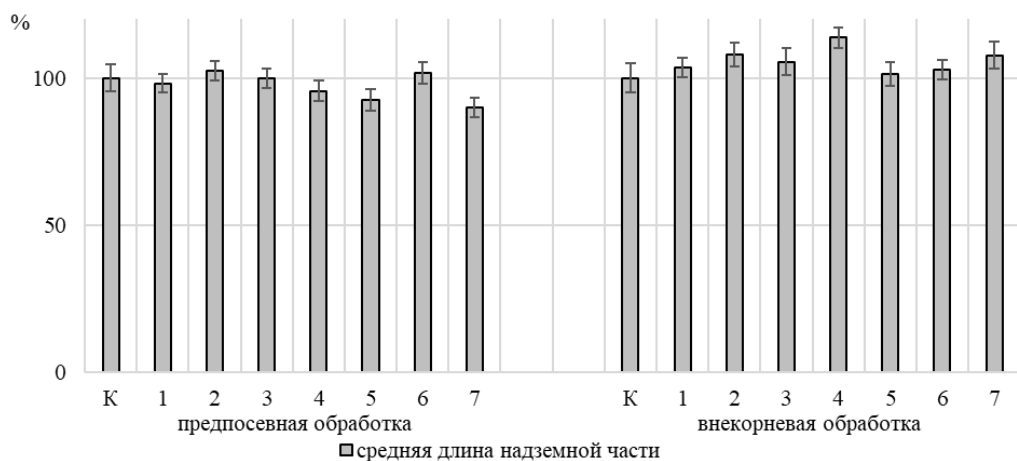


Рис. 4. Влияние ЭБ и его эфиров с серной кислотой на рост подсолнечника однолетнего в конце вегетационного периода в полевых условиях. Обозначения как на рис. 2

Fig. 4. The effect of EB and its esters on the growth of annual sunflower at the end of the growing season in the field relative to the control. Notation as in Fig. 2

Наилучший результат был получен для динатрий 2,3-дисульфата ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 113,7 % относительно контроля, $p \leq 0,05$, и на 9,7 % относительно ЭБ). Таким образом, для увеличения длины надземной части подсолнечника наиболее эффективно использование внекорневого способа внесения фитогормонов.

Интересные данные получены при исследовании воздействия изучаемых соединений на вегетативные и генеративные органы растений. Установлена обратно пропорциональная зависимость влияния ЭБ и его сульфопроизводных на вегетативные и генеративные органы растений, т. е. при увеличении зеленой биомассы уменьшается урожайность семян, и наоборот (рис. 5). При предпосевной обработке семян данная особенность замечена для большинства исследуемых веществ, за исключением 3-моносульфата ЭБ в концентрации 10^{-11} М и 23-моносульфата ЭБ в концентрации 10^{-9} М. В концентрации 10^{-9} М для ЭБ зарегистрировано повышение средней массы семян относительно контроля на 22,8 %, для 2-моносульфата ЭБ – на 6,2, для 2,3-дисульфата ЭБ – на 8,9 %. При опрыскивании растений данная закономерность менее выражена, исключением является динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-9} М, обработка которым приводит к повышению как биомассы (на 53,8 %), так и урожайности семян (на 39,4 %) относи-

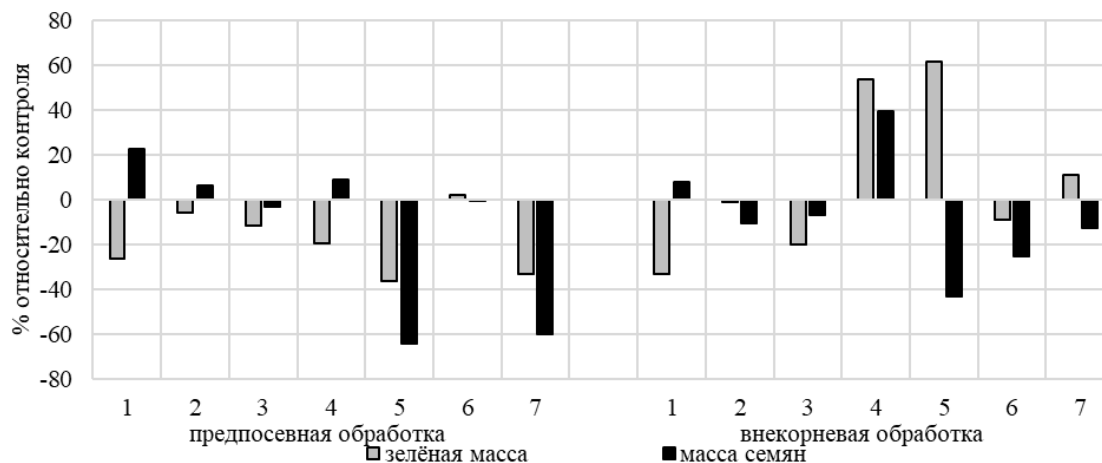


Рис. 5. Влияние ЭБ и его эфиров с серной кислотой на массу семян и зеленую массу растений подсолнечника однолетнего в полевых условиях. 1 – ЭБ в концентрации 10^{-9} М; 2 – 2-нс в концентрации 10^{-9} М; 3, 4 – 2,3-дндс в концентрациях 10^{-11} и 10^{-9} М; 5 – 3-нс 10^{-11} М; 6, 7 – 23-нс в концентрациях 10^{-10} и 10^{-9} М

Fig. 5. The effect of EB and its esters on the mass of seeds and the green mass of annual sunflower plants in the field 1 – EB at a concentration of 10^{-9} M; 2 – 2-ss at a concentration of 10^{-9} M; 3, 4 – 2,3-dsds at concentrations of 10^{-11} and 10^{-9} M; 5 – 3-ns 10^{-11} M; 6, 7 – 23-ss at concentrations of 10^{-10} and 10^{-9} M

тельно контроля и к увеличению урожайности семян на 29,3 % относительно ЭБ. Положительное влияние относительно контроля на урожайность семян оказывает также ЭБ в концентрации 10^{-9} М (увеличение на 7,8 %). Следует отметить, что ранее нами уже фиксировалась такого рода особенность действия некоторых БС (24- ЭБ, 28-гомобрассинолида и 24-эпикастастерона) при изучении их влияния на рост и урожайность подсолнечника однолетнего сорта Лакомка [14].

Таким образом, наиболее эффективным и универсальным сульфопроизводным 24-ЭБ для повышения урожайности семян подсолнечника для двух типов обработки является 2,3-дисульфат динатрия в концентрации 10^{-9} М.

Заключение. Проведено поэтапное исследование воздействия 24-ЭБ и его эфиров с серной кислотой в контролируемых лабораторных условиях, а также в полевых опытах, характеризующихся широким спектром экологических факторов. В лабораторных условиях на беспочвенной среде наиболее выраженное влияние на длину подземной (корни) и надземной (гипокотили) частей подсолнечника относительно контроля и 24-ЭБ оказывает динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-11} М.

В лабораторном вегетационном опыте при предпосевной обработке семян значительную активность относительно контроля и ЭБ на длину подземной и надземной частей оказывает также динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-9} М, эффективность выявлена для натрий 23-моносульфата ЭБ в концентрации 10^{-10} М. При внекорневой обработке выраженную активность относительно контроля и ЭБ оказывают динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-11} М и натрий 23-моносульфат ЭБ в концентрации 10^{-9} М.

В полевых условиях к концу вегетационного периода на длину надземной части подсолнечника значительное влияние оказала только внекорневая обработка динатрий 2,3-дисульфатом ЭБ в концентрации 10^{-9} М. Отмечена обратно пропорциональная зависимость влияния на вегетативные и генеративные органы – при увеличении зеленой биомассы уменьшается урожайность семян. Исключение составляет динатрий 2,3-дисульфат ЭБ в концентрации 10^{-9} М при внекорневой обработке подсолнечника.

В результате проведенных исследований показано, что введение одной или нескольких сульфогрупп в молекулу 24-ЭБ, как правило, не инактивирует действие последнего. Образовавшиеся сульфаты (в виде натриевых солей) действуют в характерных для каждого концентрациях, сопоставимых с концентрацией исходного БС, а ростстимулирующий эффект зависит от способа их внесения. Наиболее эффективным и универсальным сульфопроизводным 24-ЭБ по влиянию на морфологические параметры подсолнечника для двух типов обработки является динатриевая соль 2,3-дисульфата 24-ЭБ.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках НИР «Оценка влияния фитогормонов стероидной природы и их производных на структурные и функциональные параметры некоторых сельскохозяйственных и фиторемедиационных культур» (2019–2020) в рамках ГПНИ на 2016–2020 годы «Химические технологии и материалы», подпрограмма 3 «Биорегуляторы растений». Грант № 20193099 от 30.12.19.

Выражаем благодарность за любезно предоставленные семена подсолнечника Республиканскому научному дочернему унитарному предприятию «Полесский институт растениеводства» (г. Мозырь).

Acknowledgements. The study was carried out as part of the research work “Assessment of the influence of phytohormones of a steroid nature and their derivatives on the structural and functional parameters of some agricultural and phytoremediation crops” (2019–2020) as part of the SPNI for 2016–2020 “Chemical technologies and materials”, subprogram 3 “Plant bioregulators”. Grant No. 20193099 dated 12/30/19.

We express our gratitude for the kindly provided sunflower seeds to the Republican Scientific Subsidiary Unitary Enterprise “Polesye Institute of Plant Growing” (Mozyr).

Список использованных источников

1. Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones / ed. : S. Hayat, A. Ahmad. – Dordrecht : Springer, 2011. – 462 p.
2. Данилович, И. С. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причины, следствия, прогнозы / И. С. Данилович, В. И. Мельник, Б. Гейер // Журн. Бел. гос. ун-та. География. Геология. – 2020. – № 1. – С. 3–13.
3. Gornik, K. Application of phytohormones during seed hydropriming and heat shock treatment on sunflower (*Helianthus annuus* L.) chilling resistance and changes in soluble carbohydrates / K. Gornik, L. Lahuta // Acta Physiol. Plant. – 2017. – Vol. 39, N 5. – Art. 118. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2413-x>
4. Алиева, З. М. Протекторное действие эпибрассинолида на черенки различных культур в условиях засоления / З. М. Алиева, Л. Д. Прусакова, А. Г. Юсуфов // Агрехимия. – 2004. – № 9. – С. 68–74.
5. Волотович, А. А. Влияние 24-эпибрассинолида на продуктивность подсолнечника *Helianthus annuus* L. / А. А. Волотович, О. А. Кудряшова, Н. Б. Хрипач // Химия, структура и функция биомолекул : тез. II Междунар. конф., Минск, 3–5 окт. 2006 г. / Ин-т биоорганической химии НАН Беларуси ; редкол.: Н. Б. Хрипач [и др.]. – Минск, 2006. – С. 18.
6. Inactivation of brassinosteroid biological activity by a salicylate-inducible steroid sulfotransferase from *Brassica napus* / M. Rouleau [et al.] // J. Biol. Chem. – 1999. – Vol. 274, N 30. – P. 20925–20930. <https://doi.org/10.1074/jbc.274.30.20925>
7. Membrane transporters for sulfated steroids in the human testis – cellular localization, expression pattern and functional analysis / D. Fietz [et al.] // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8, N 5. – P. e62638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062638>
8. Dawson, P. A. The biological roles of steroid sulfonation / P. A. Dawson // From Physiol. to Clin. Med. – 2012. – Vol. 36, N 5. – P. 45–64. <https://doi.org/10.5772/52714>
9. Synthesis of sulfated brassinosteroids / H. Zhylitskaya [et al.] // Steroids. – 2017. – N 117. – P. 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2016.06.006>
10. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038–84. Введ. 01.07.86. – М. : Стандартинформ, 2011. – 29 с.
11. Методика определения силы роста семян кормовых культур / В. И. Карпин [и др.]. – М. : Изд-во РГАУ–МСХА, 2012. – 15 с.
12. Phenotypic seedling responses of a metal-tolerant mutant line of sunflower growing on a Cu-contaminated soil series: potential uses for biomonitoring of Cu exposure and phytoremediation / A. Kolbas [et al.] // Plant Soil. – 2014. – Vol. 376. – P. 377–397. <http://doi.org/10.1007/s11104-013-1974-8>
13. Агрехимические методы исследований : учеб.-метод. пособие / В. Н. Дышко [и др.]. – Смоленск : ФГБОУ ВПО «Смоленская ГСХА», 2014. – 197 с.
14. Арчибасова, Я. В. Влияние брассиностероидов на морфометрические показатели *Helianthus annuus* в полевых условиях / Я. В. Арчибасова, А. П. Колбас // Весн. Брэсц. ун-та, сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2020. – № 1. – С. 20–27.

References

1. Hayat S., Ahmad A. (eds.). *Brassinosteroids: A Class of Plant Hormones*. Dordrecht, Springer Publ., 2011. 462 p.
2. Danilovich I. S., Mel'nik V. I., Geier B. The current climate changes in Belarusian Polesje region: factors, consequences, projections. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*, 2020, no. 1, pp. 3–13 (in Russian).
3. Gornik K., Lahuta L. Application of phytohormones during seed hydropriming and heat shock treatment on sunflower (*Helianthus annuus* L.) chilling resistance and changes in soluble carbohydrate. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017, vol. 39, no. 5, art. 118. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2413-x>
4. Alieva Z. M., Prusakova L. D., Yusufov A. G. The protective effect of epibrassinolide on cuttings of different plants under salinization conditions. *Agrokhimiya* [Agrochemistry], 2004, no. 9, pp. 68–74 (in Russian).
5. Volotovich A. A., Kudryashova O. A., Khripach N. B. Effect of 24-epibrassinolide on the productivity of sunflower *Helianthus annuus* L. *Khimiya, struktura i funktsiya biomolekul : tezisy II Mezhdunarodnoi konferentsii (Minsk, 3–5 oktyabrya 2006)* [Chemistry, structure and function of biomolecules: abstracts of II Int. conference (Minsk, October 3–5, 2006)]. Minsk, 2006, p. 18 (in Russian).

6. Rouleau M., Marsolais F., Richard M., Voigt B., Adam G., Varin L. Inactivation of brassinosteroid biological activity by a salicylate-inducible steroid sulfotransferase from *Brassica napus*. *Journal of Biological Chemistry*, 1999, vol. 274, no. 30, pp. 20925–20930. <https://doi.org/10.1074/jbc.274.30.20925>
7. Fietz D., Bakhaus K., Wapelhorst B., Grosser G., Günther S., Alber J. [et al.]. Membrane transporters for sulfated steroids in the human testis – cellular localization, expression pattern and functional analysis. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, no. 5, p. e62638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062638>
8. Dawson P. A. The biological roles of steroid sulfonation. *From Physiology to Clinical Medicine*, 2012, vol. 36, no. 5, pp. 45–64. <https://doi.org/10.5772/52714>
9. Zhylitskaya H., Chashchina N., Litvinovskaya R., Zavadskaya M., Zhabinskii V., Khripach V. Synthesis of sulfated brassinosteroids. *Steroids*, 2017, no. 117, pp. 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.steroids.2016.06.006>
10. *State Standard 12038-84. Seeds of crops. Methods for determination of germination*. Moscow, Standartinform Publ., 1985. 29 p. (in Russian).
11. Karpin V. I. *The method of determining the growth strength of seeds of fodder crops*. Moscow, Publishing house of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, 2012. 15 p. (in Russian).
12. Kolbas A., Marchand L., Herzig R., Nehnevajova E., Mench M. Phenotypic seedling responses of a metal-tolerant mutant line of sunflower growing on a Cu-contaminated soil series: potential uses for biomonitoring of Cu exposure and phytoremediation. *Plant and Soil*, 2014, vol. 376, pp. 377–397. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1974-8>
13. Dyshko V. N., Dyshko, V. V., Romanenko P. V., Sluchenkova N. V. *Agrochemical research methods*. Smolensk, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Smolensk State Agricultural Academy”, 2014. 197 p. (in Russian).
14. Archibasova Ya. V., Kolbas A. P. Effects of brassinosteroids on morphometric parameters *Vesnik Brestskaga universiteta. Seriya 5. Khimiya. Biyalogiya. Navuki ab zyamli* [Bulletin of Brest University. Series 5. Chemistry. Biology. Earth Sciences], 2020, no. 1, pp. 20–27 (in Russian).

Информация об авторах

Хомюк Яна Валерьевна – аспирант. Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина (бульвар Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Республика Беларусь). E-mail: archibasovayana@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5740-7341>

Литвиновская Раиса Павловна – д-р хим. наук, гл. науч. сотрудник. Институт биоорганической химии НАН Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: litvin@iboch.by. <https://orcid.org/0000-0002-9657-0790>

Колбас Александр Петрович – канд. биол. наук, доцент, начальник Центра экологии (бульвар Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Республика Беларусь). E-mail: kolbas77@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4722-2930>

Information about the authors

Yana V. Khamiuk – Postgraduate student. Brest State A. S. Pushkin University (21, Kosmonavtov Boulevard, 224016, Brest, Republic of Belarus). E-mail: archibasovayana@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5740-7341>

Raisa P. Litvinovskaya – D. Sc. (Chem.), Chief Researcher. Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: litvin@iboch.by. <https://orcid.org/0000-0002-9657-0790>

Aliaksandr P. Kolbas – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, director of Ecology center. Brest State A. S. Pushkin University (21, Kosmonavtov Boulevard, 224016, Brest, Republic of Belarus). E-mail: kolbas77@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4722-2930>