

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БОТАНИКИ ИМЕНИ В.Ф.КУПРЕВИЧА  
НАН БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 582.263:546.712

КЕМ

Карина Робертовна

ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ  
БРАССИНОСТЕРОИДОВ НА РОСТ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СТРЕССА

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук  
по специальности 03.05.01 – физиология и биохимия растений**

Минск, 2024

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси».

Научный руководитель: **Ламан Николай Афанасьевич**,  
доктор биологических наук, профессор, академик НАН Беларуси, заведующий лабораторией роста и развития растений государственного научного учреждения «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси»

Официальные оппоненты: **Кабашникова Людмила Федоровна**,  
доктор биологических наук, доцент, член-корреспондент НАН Беларуси, заведующий лабораторией прикладной биофизики и биохимии ГНУ «Институт биофизики и клеточной инженерии Национальной академии наук Беларуси»

**Филиппова Светлана Николаевна**,  
кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры клеточной биологии и биоинженерии растений Белорусского государственного университета  
Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение «Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси»

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.38.01 в государственном научном учреждении «Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 27. E-mail: nan.botany@yandex.by. Телефон: (017) 378-14-69. Факс: (017) 322-18-53.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Якуба Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан «22» ноября 2024 года

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат биологических наук, доцент

Е. Я. Куликова

## ВВЕДЕНИЕ

В диссертационном исследовании рассматриваются вопросы, связанные с изучением индивидуального и совместного действия компонентов brassinosterоид-пестицидных смесей, биохимические аспекты реакций растений на обработку, а также приводится обоснование применения определенных композиций для повышения продуктивности и качества выходной продукции льна-долгунца в производственных условиях.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### **Связь работы с научными программами (проектами), темами.**

Исследования, результаты которых были использованы в диссертационной работе, выполнялись в рамках перечисленных ниже заданий:

– задание 3.09 «Исследование физиологического действия на растения малых доз 6-фосфонометилглицина (глифосата) и его препаративных форм» (№ ГР 20141858);

– задание 3.04 «Браassinosterоид-пестицидные композиции как инновационный инструмент управления продуктивностью и устойчивостью растений: исследование зависимости «доза-эффект»» (№ ГР 20160681);

– задание 3.22 «Браassinosterоид-пестицидные композиции как инновационный инструмент управления продуктивностью и устойчивостью растений: исследование взаимосвязи «гормональная структура – активность»» (№ ГР 20190896);

– НИР 2 «Механизмы, определяющие эффект гормезиса при обработке растений малыми и сверхмалыми дозами гербицидов – специфических ингибиторов биосинтеза аминокислот и их композиций с brassinosterоидами» (№ ГР 20210304).

Диссертационная работа соответствует «Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы», пункт 2 «Биологические, химические, медицинские и фармацевтические технологии и производства» (Указ Президента Республики Беларусь №156 от 07.05.2020).

**Цель исследований:** изучить физиологические эффекты малых доз brassinosterоидов и ряда гербицидов как стрессоров, а также их композиций на растительные организмы. Выявить зависимость доза-эффект в действии brassinosterоидов и brassinosterоид-гербицидных смесей на рост корневой системы проростков сельскохозяйственных культур, урожайность и качество продукции льна-долгунца.

#### **Задачи исследований:**

– дать оценку зависимости доза-эффект при действии brassinosterоидов в опытах на проростках различных сельскохозяйственных культур;

- выявить зависимость доза-эффект в действии N-фосфонометилглицина, метсульфурон-метила,  $\alpha$ -нафтилуксусной кислоты на рост проростков;
- исследовать сравнительное действие brassиностероидов лактонной и кетонной структуры на рост проростков в условиях стресса;
- определить физиолого-биохимические аспекты действия brassиностероидов, N-фосфонометилглицина и их смесей на растения;
- выявить наиболее эффективные для практического использования варианты brassиностероид-пестицидных композиций.

**Объекты исследования** – проростки ярового ячменя и озимого рапса, проростки и вегетирующие растения льна-долгунца.

**Предмет исследования** – влияние brassиностероидов, ряда гербицидов и росторегуляторов, а также их композиций на рост, физиолого-биохимические показатели и качество выходной продукции льна-долгунца (льноволокна).

#### **Научная новизна.**

– Впервые получены данные о том, что эффекты действия N-фосфонометилглицина в ингибирующей дозе в смеси с brassиностероидами выявляются в узком диапазоне концентраций БС, в пределах которого они, в зависимости от видовой принадлежности растений, усиливают или ослабляют гербицидное действие глифосата на рост корневой системы проростков.

– Установлено, что диапазоны концентраций brassиностероидов, в которых наблюдается максимальный эффект их действия на фоне химического стресса, практически совпадают по культурам и сортам для каждого из БС и не зависят от их химической структуры.

– Выявлена значительная видовая и сортовая чувствительность проростков льна-долгунца, озимого рапса и ярового ячменя на действие стрессовых факторов химической природы: N-фосфонометилглицина, метсульфурон-метила и  $\alpha$ -нафтилуксусной кислоты.

– С помощью метода ВЭЖХ показано повышение накопления шикимовой кислоты и ее производных в тканях растений, выращенных из семян, инкрустированных глифосатом. Также установлено значительное снижение этого показателя у льна-долгунца за счет внесения в инкрустационную смесь эпибрасинолида и повышение накопления шикиматов у проростков ярового ячменя, что указывает на факт действия данных агентов на один и тот же этап биосинтеза ароматических соединений.

– Получены данные, позволяющие предположить, что особенности регуляции brassиностероидами физиолого-биохимических процессов в клетке могут быть обусловлены выполнением ими на негеномном уровне роли сигнально-регуляторных компонентов клеточных мембран.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Установлено, что зависимость доза-эффект при воздействии глифосата,  $\alpha$ -нафтилуксусной кислоты и метсульфурон-метила в широком диапазоне концентраций на рост корневой системы *Hordeum vulgare* L. и *Linum usitatissimum* L. имеет четыре зоны в соответствии с типом реакции: зона гормезиса (стимуляции роста), зона умеренного ингибирования, зона сильного ингибирования, зона остановки роста.

2. Протекторное действие brassinостероидов (БС) на ростовые процессы корневой системы проростков *Hordeum vulgare* L. и *Linum usitatissimum* L. при ингибировании их метсульфурон-метилом, глифосатом,  $\alpha$ -нафтилуксусной кислотой и NaCl осуществляется в узком диапазоне концентраций. Для brassинолида, гомобраинолида, эпибраинолида, кастастерона и гомокастастерона вне зависимости от природы стрессора он составляет  $10^{-8}$  –  $10^{-7}$  М. Самым широким диапазоном концентраций, в котором проявляется активность фитогормона в стрессовых условиях, обладает эпикастастерон: от  $10^{-10}$  до  $10^{-7}$  М. Исключением в характере эффектов БС является влияние на рост корней *Hordeum vulgare* L. на фоне стресса, вызванного глифосатом – ингибирующий эффект гербицида в их присутствии усиливается.

3. Ингибирующее влияние глифосата на рост корней *Hordeum vulgare* L. сопровождается более высоким накоплением шикиматов в присутствии brassиностероидов (БС), а то время как у *Linum usitatissimum* L. наблюдается противоположный эффект – снижение содержания шикиматов в тканях проростков при добавлении БС. Эти факты указывают на то, что важной мишенью регуляторного действия стероидных фитогормонов у высших растений являются системы шикиматного пути биосинтеза.

4. Обработка растений льна-долгунца в фазу елочки композицией регуляторов роста, включающей brassиностероиды, N-фосфонометилглицин и  $\alpha$ -нафтилуксусную кислоту, увеличивает количество волокон в пучке и толщину стенки элементарного волокна, что обуславливает повышение прочности льноволокна на разрыв в 1,5–1,7 раза.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Диссертационная работа выполнена лично автором и является законченным научным трудом. В работу включены исследования автора, выполненные на базе лаборатории роста и развития растений, а также результаты полевых опытов, проведенных с 2020 по 2022 год на базе РУП «Институт льна». Разработка программы исследований, схем лабораторных и полевых экспериментов осуществлялась совместно с научным руководителем, академиком Н.А. Ламаном. Анализ литературных источников, проведение лабораторных исследований, закладка полевых опытов, учет морфометрических показателей и проведение анатомических исследований растительных срезов, систематизация, статистическая обработка и интерпретация полученных результатов

осуществлялось лично автором. Исходные растворы брассиностероидов синтезированы и любезно предоставлены для проведения исследований лабораторией химии стероидов Института биоорганической химии НАН Беларуси под руководством академика В. А. Хрипача. Определение урожайности и качества тресты и льноволокна в полевых экспериментах проводилось сотрудниками лаборатории качества льнопродукции РУП «Институт льна». Вклад соискателя в опубликованные работы составляет 80–85% от всего объема работ, выполненных по теме диссертации.

**Апробация диссертации и информация об использовании результатов.** Практическое использование результатов исследования подтверждено двумя актами о практическом использовании в ОП «Ляховичский аграрный колледж» УО «Барановичский государственный университет» (протокол № 7 от 09.02.2023 г.), актом полевых испытаний в РУП «Институт льна» от 17 января 2024 года. Получено положительное решение предварительной экспертизы по заявке на патент «Способ повышения урожайности и качества волокна льна-долгунца», регистрационный номер а20240100 от 29 апреля 2024 года.

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были доложены на международных конференциях.

*При очном участии соискателя:* IV (XII) Международная ботаническая конференция молодых ученых в Санкт-Петербурге (22–28 апреля, 2018); VI International conference «Chemistry, structure and function of biomolecules» (Minsk, May 22–25, 2018); International Scientific Conference «Plants Stress and Adaptation» (Kharkiv, February 25–26, 2021); VII International conference on chemistry, structure and function of biomolecules (Minsk, November 23–25, 2021); «Регуляция роста, развития и продуктивности растений» 2015 и 2018 года; «Молодежь в науке» – 2016, 2017 годов.

*При заочной публикации материалов:* 24th Conference on Isoprenoids (Bialystok, Poland, September 9, 2018); Всероссийская конференция с участием иностранных ученых «Растительное разнообразие: состояние, тренды, концепция сохранения» (Новосибирск, 30 сентября – 03 октября, 2020); Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты. XI международный симпозиум (Москва, 11–15 апреля, 2022); VI Всероссийская научная конференция «Устойчивость растений и микроорганизмов к неблагоприятным факторам среды» (Иркутск, 03–07 июля 2023).

**Опубликованность результатов диссертации.** По материалам диссертационного исследования опубликовано 7 статей в научных изданиях из перечня ВАК РБ общим объемом 3,3 авторских листа и 23 работы в материалах и тезисах докладов конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа включает введение, общую характеристику работы, обзор литературы, описание объекта и методов исследования, 4 экспериментальные главы, отражающие результаты исследований, заключение, список литературы, содержащий 329 источников (из них 30 –

собственные публикации, 145 – русскоязычные, 184 – на иностранных языках), приложение. Текст диссертации изложен на 166 страницах (основной текст – 134, таблицы и рисунки – 32 страницы). Всего в диссертации 66 рисунков, 11 таблиц. Приложение занимает 5 страниц и содержит 2 акта внедрения научных результатов и 1 уведомление о положительном результате предварительной экспертизы по заявке на выдачу патента на изобретение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В аналитическом обзоре литературы** проанализирована информация отечественных и зарубежных исследователей по вопросам эффекта гормезиса и его использования для стимулирования роста растений; адаптогенного и иммуномодулирующего действия brassinosteroidов; механизма действия глифосат-содержащих гербицидов; проблем изучения зависимости доза-эффект при комбинированном действии факторов; вопросов использования ростостимуляторов и brassinosteroid-пестицидных композиций для повышения урожайности и качества льноволокна.

**Объекты и методы исследования.** Объектами НИР являлись проростки и взрослые растения озимого рапса (сорта Империял и Зорны), ярового ячменя (сорта Радзіміч и Фэст) и льна-долгунца (сорта Ласка, Веста и Грант).

Инкрустацию семян проводили вручную в стеклянной посуде с использованием 1% раствора пленкообразователя Гисинар (сополимер натриевой соли акриловой кислоты и акриламида). Расход рабочего раствора в опытах с отдельным применением БС и ГФ – 20 л/т семян (20μл/1г семян). В опытах со смесями БС с ингибирующей рост дозой агента расход рабочего раствора 20μл каждого из растворов на 1г семян (в сумме 40μл/1г) семян. *Проращивание семян на фильтровальной бумаге* и оценку качества посевного материала осуществляли по ГОСТ 12038-84. Оценку и учет проросших семян для определения энергии прорастания проводили на 3-е сутки, всхожести – на 7-е сутки.

*Проращивание семян методом рулонной культуры* производилось по методике (Ламан и др., 2000) с модификацией (Судник и др., 2011). Рулоны выдерживались 2-е суток при температуре 22°C в термостате, на 3-е сутки выставлялись в условия искусственного освещения интенсивностью 7,5 тыс. люкс (16 ч – свет, 8 ч – темнота). Продолжительность опыта составляла 9 суток, на последние сутки у проростков фиксировали изменение линейных размеров корней и надземной части. В проведенных исследованиях все измерения осуществляли в трехкратной повторности. В каждом варианте измеряли показатели у 15, в контроле – у 45 проростков.

*Сумму фенольных соединений* в тканях проростков определяли по методу, основанному на реакции фенолов с раствором Фолина-Чокальтеу и описанному в

(Мазец и др., 2010). *Определение суммарного содержания флавоноидов* в тканях проростков определяли по методу, описанному в (Бубенчиков, 2011).

*Определение накопления шикимовой кислоты и ее производных* в тканях проростков проводили методом ВЭЖХ на хроматографе Ultimate 3000 с колонкой Nucleodur C18 Gravity 4,6×250 мм, размер частиц 5 мкм. Условия анализа описаны в (Кем К.Р. и др., 2022).

*Изучение поперечных анатомических срезов стеблей льна* выполняли с помощью микроскопа МБА (ТУ 14724552.048-97) с объективом БелЛомо (10<sup>x</sup>/0,25) и камеры Науер HI-SPEED USB 2.0. Измерение линейных параметров отдельных структур осуществляли объект-микрометром (1 DIV=0,01мм). Выведение и преобразование данных на компьютер выполнялось посредством программы Науер версия x64, 4.10.17214.20200601.

*Полевые опыты по изучению влияния brassinosteroid-пестицидных композиций* на растения льна-долгунца выполняли в течение трех лет совместно с РУП «Институт льна» (аг. Устье) на экспериментальных участках. Площадь и расположение делянок: опытной – 20 м<sup>2</sup>; учетной – 12,5 м<sup>2</sup>, повторность четырехкратная; расположение рендомизированное. Проведение экспериментов осуществлялось с 2020 по 2022 годы. Определение урожайности и качества тресты и льноволокна в полевых экспериментах проводилось сотрудниками лаборатории качества льнопродукции РУП «Институт льна».

*Для статистической обработки полученных данных* использовались пакеты программ Excel 2010, Statistika 6.0 и Analysis of Variance (One-way ANOVA). Все исследования проводили не менее чем в трех биологических и аналитических повторностях. В тексте диссертации приведены средние статистические значения и их стандартные ошибки. Различия по отношению к контролю оценивали с помощью t-критерия Стьюдента при уровне значимости  $p \leq 0,05$ .

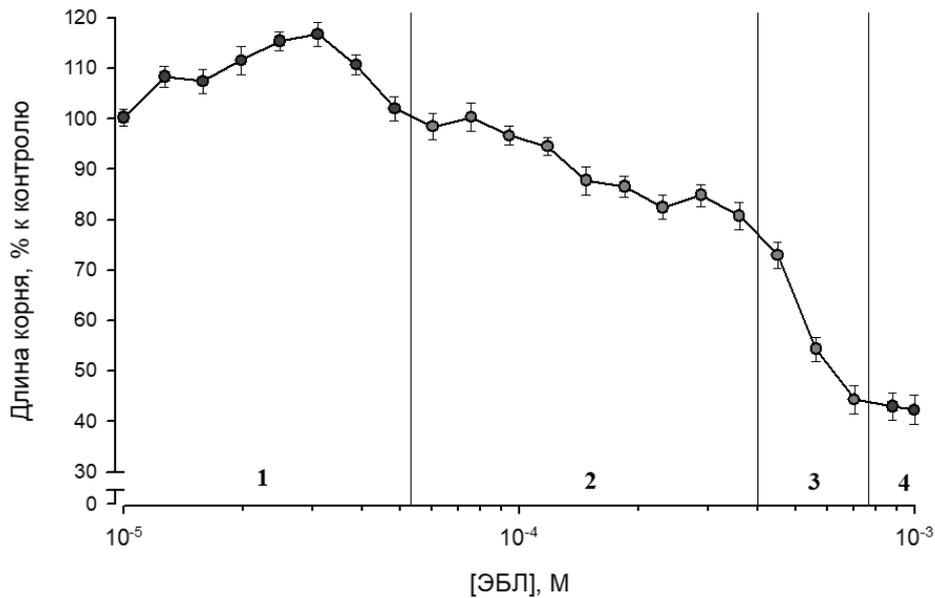
### **Влияние N-фосфонометилглицина в широком диапазоне концентраций на рост проростков**

Анализ полученного экспериментального материала позволил сделать вывод о том, что кривая зависимости доза-эффект при действии химических стрессоров в широких диапазонах концентраций на проростки растений имеет четкое деление на четыре зоны (рисунок 1) в соответствии с типом ответной ростовой реакции их корневой системы:

- 1) зона стимуляции (гормезиса); концентрации, при которых показатели длины корня/надземной части проростка достоверно превосходят контроль;
- 2) зона умеренного ингибирования роста; концентрации, при которых наблюдается плавное нарастание угнетения роста корня/надземной части;
- 3) зона сильного ингибирования ростовых процессов;

## 4) зона остановки роста проростков.

Подобный вид кривой зависимости доза-эффект наблюдался в экспериментах со всеми исследуемыми культурами и воспроизводился от опыта к опыту.



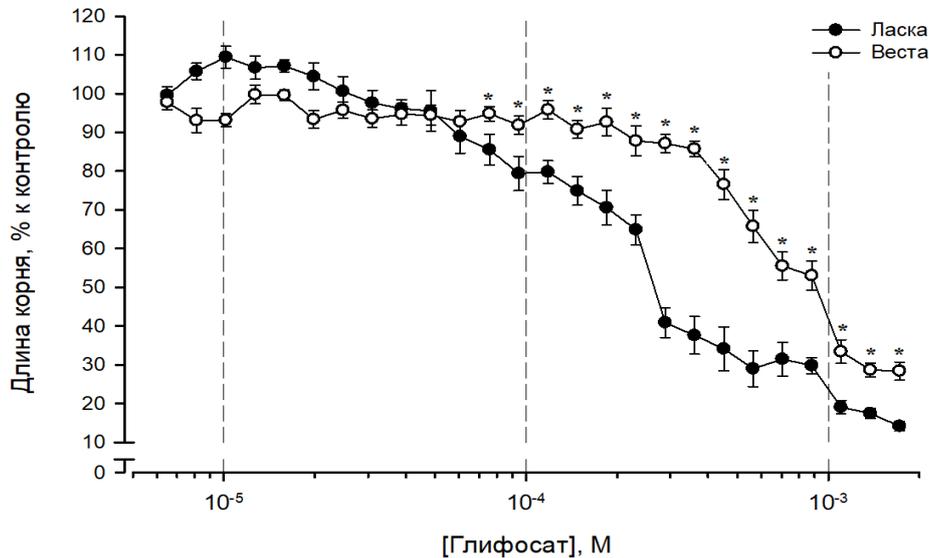
**Рисунок 1 – Кривая зависимости доза-эффект на примере реакции корневой системы проростков ярового ячменя на инкрустацию семян различными дозами глифосата**

При изучении влияния N-фосфонометилглицина в широком диапазоне концентраций на проростки озимого рапса выявлено, что средняя длина корней у проростков сорта Империял, статистически не отличалась от средней длины корней контроля в диапазоне концентраций от  $6,5 \cdot 10^{-6}$  до  $3,0 \cdot 10^{-5}$  М. Сорт Зорны показал более высокую чувствительность к воздействию глифосата. Так концентрация, начиная с которой наблюдалось резкое ингибирование роста корней, составляла  $4,1 \cdot 10^{-4}$  М, в то время как у сорта Империял снижение роста происходило плавно при нарастании концентраций.

У проростков ярового ячменя также выявлена сортовая специфичность ростовой реакции на обработку семян глифосатом. Сорт Фэст показал более высокую чувствительность к действию N-фосфонометилглицина. Резкое ингибирование роста корня для него начинается от концентрации  $3,6 \cdot 10^{-4}$  М, а для сорта Радзіміч – от концентрации  $5,1 \cdot 10^{-4}$  М, т.е. в 1,5 раза выше. Также для обоих сортов выявлены диапазоны стимуляции роста корневой системы: от  $1,3 \cdot 10^{-5}$  М до  $3,9 \cdot 10^{-5}$  М у сорта Радзіміч и от  $1,9 \cdot 10^{-5}$  М до  $7,5 \cdot 10^{-5}$  М для сорта Фэст.

Аналогичные эксперименты были проведены на сортах льна-долгунца Ласка и Веста (рисунок 2). В опыте со льном-долгунцом сорта Ласка обнаружена небольшая зона стимуляции роста корневой системы в диапазоне концентраций глифосата от  $8,1 \cdot 10^{-6}$  М до  $1,19 \cdot 10^{-5}$  М (на 9 сутки). Величина стимуляции в высшей точке имела показатель 109,4% по отношению к контролю. Для льна-долгунца сорта Веста эффект

стимуляции не выявлен. Концентрация, при которой начинается резкое ингибирование роста корня для сорта Ласка, составила  $2,8 \cdot 10^{-4}$  М, тогда как для сорта Веста –  $5,1 \cdot 10^{-4}$  М, т.е. в 2 раза выше.



**Рисунок 2 – Зависимость длины корня проростков льна-долгунца сортов Веста и Ласка от концентрации глифосата на 9-ые сутки**

Важно отметить, что результаты исследования указывают на наличие значительной сортовой специфичности ростовых реакций у всех исследуемых культур при инкрустации семян растворами глифосата.

### **Влияние БС на проростки льна-долгунца и ярового ячменя на фоне химического стресса и при засолении (NaCl)**

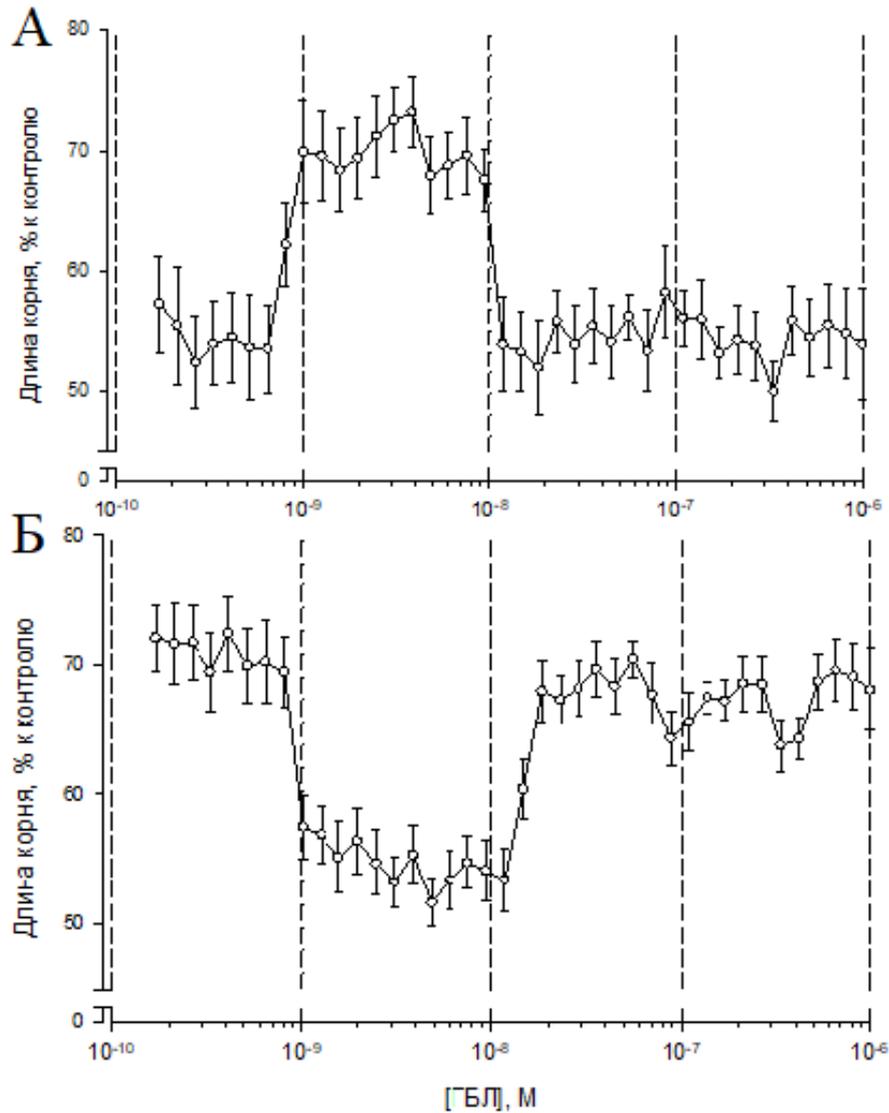
Известно, что brassinosteroids являются стимуляторами роста, однако вопреки ожиданиям, не получено достоверных различий между вариантами опытов, проведенных с разными сортами льна-долгунца и ярового ячменя в широком диапазоне концентраций исследуемых БС – все отклонения длины корневой системы и надземной части проростков от контроля находились в пределах статистической погрешности. Лишь в некоторых случаях было выявлено угнетающее действие БС на рост корневой системы в высоких концентрациях. Так, brassinolid угнетал рост корня проростков от концентрации  $1,7 \cdot 10^{-5}$  М и выше у льна-долгунца (от  $6,9 \cdot 10^{-6}$  М у ячменя); кастастерон от концентрации  $2,6 \cdot 10^{-5}$  М у льна-долгунца (от  $2,1 \cdot 10^{-6}$  М у ячменя); гомокастастерон от концентрации  $2,6 \cdot 10^{-5}$  М у льна-долгунца ( $1,1 \cdot 10^{-5}$  М у ячменя).

Активность brassinosteroids, согласно нашим исследованиям и литературным данным, лучше всего проявляется на фоне стресса. Для выявления диапазона наиболее активных концентраций brassinosteroids было решено

провести ряд экспериментов по изучению влияния различных БС в широком диапазоне концентраций на фоне угнетающего действия N-фосфометилглицина,  $\alpha$ -нафтилукстусной кислоты, метсульфурон-метила и засоления (NaCl) в концентрациях, при которых ингибирование роста корневой системы проростков составляет около 50%.

**Глифосат.** Исследование проводили с использованием brassinosterоидов (БС) лактонной группы – эпибрасинолида (ЭБЛ), брасинолида (БЛ) и гомобрасинолида (ГБЛ), и кетонной группы – кастастерона (КС), гомокастастерона (ГКС) и эпикастастерона (ЭКС). Диапазоны концентраций данных соединений в опыте составляли: для ЭБЛ от  $1,1 \cdot 10^{-9}$  до  $1,1 \cdot 10^{-5}$  М, для ГБЛ от  $1,7 \cdot 10^{-10}$  до  $1,6 \cdot 10^{-6}$  М, для БЛ, КС и ГКС от  $1,7 \cdot 10^{-8}$  до  $1,0 \cdot 10^{-4}$  М, для ЭКС от  $1,0 \cdot 10^{-9}$  до  $1,0 \cdot 10^{-5}$  М, с повариантным изменением концентрации в 1,25 раза в 1% водном растворе пленкообразователя Гисинар. Концентрация глифосата составила  $5,1 \cdot 10^{-4}$  М для ярового ячменя (сорт Радзимич) и льна-долгунца (сорт Грант).

В результате были выявлены ярко выраженные диапазоны концентраций (таблица 1), в пределах которых наблюдается действие БС, проявляющееся как в снижении ингибирующего действия гербицида на рост корня у проростков льна-долгунца, так и в его усилении у проростков ярового ячменя (рисунок 3). Иллюстрация диапазонов активности БС представлена на рисунках на примере действия гомобрасинолида. Такие диапазоны, близкие по концентрациям, выявлены для каждого из БС, и в каждом случае действие на проростки льна-долгунца и ярового ячменя было диаметрально противоположным. Самый широкий диапазон активности имел эпикастастерон – изменение концентрации внутри диапазона  $> 1500$  раз. Что касается надземной части проростков, то колебание ее длины по вариантам незначительны у льна-долгунца в условиях девятидневного эксперимента; для ярового ячменя оно более выражено, но значительно слабее, чем у корневой системы проростков, обладающей большей чувствительностью к действию глифосата.

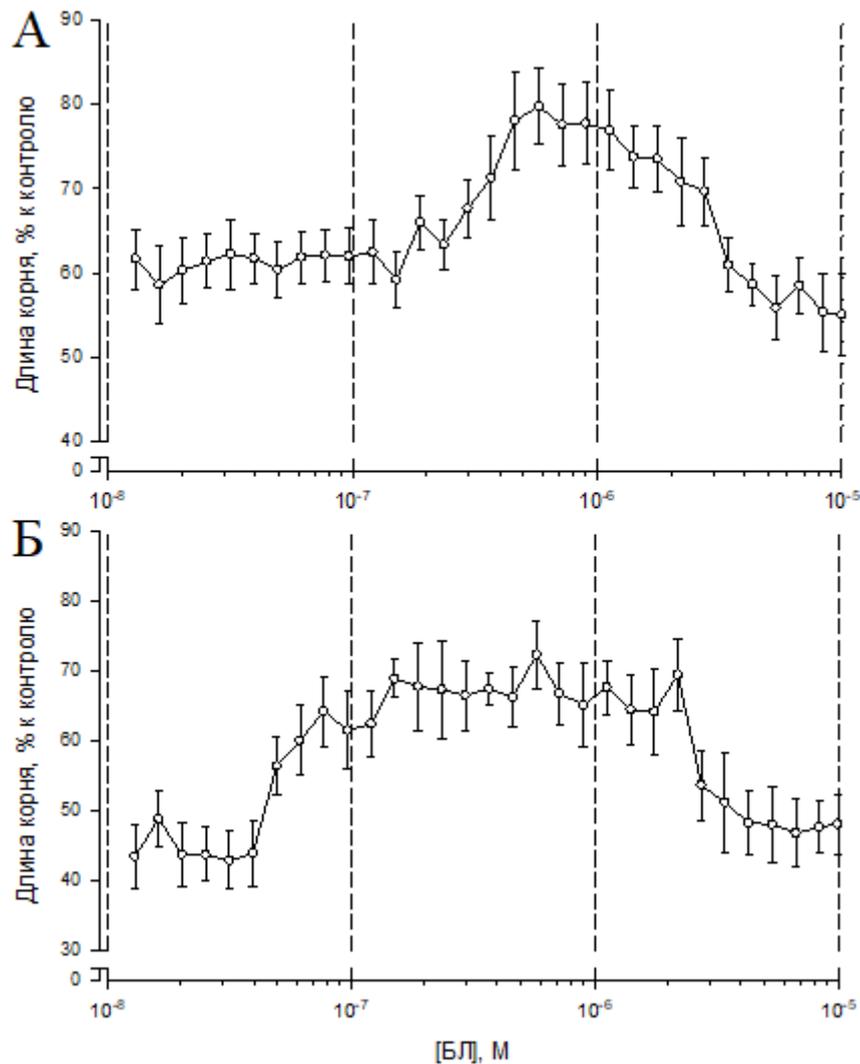


**Рисунок 3 – Зависимость длины корня проростков льна-долгунца сорта Грант (А) и ярового ячменя сорта Радзіміч (Б) от ГБЛ, при концентрации глифосата  $5,1 \cdot 10^{-4}$  М**

**Таблица 1 – Диапазоны активности brassinosterоидов на фоне химического стресса, вызванного N-фосфонометилглицином**

БС	Ячмень яровой (сорт Радзіміч)	Лен-долгунец (сорт Грант)
Лактоны		
БЛ	$3,3 \cdot 10^{-8}$ до $3,4 \cdot 10^{-7}$ М	$5,1 \cdot 10^{-8}$ до $3,4 \cdot 10^{-7}$ М
ГБЛ	$1,0 \cdot 10^{-9}$ до $1,5 \cdot 10^{-8}$ М	$1,0 \cdot 10^{-9}$ до $9,4 \cdot 10^{-9}$ М
ЭБЛ	$4,7 \cdot 10^{-8}$ до $2,8 \cdot 10^{-7}$ М	$5,9 \cdot 10^{-8}$ до $4,4 \cdot 10^{-7}$ М (сорт Ласка)
Кетоны		
КС	$4,1 \cdot 10^{-8}$ до $5,9 \cdot 10^{-7}$ М	$1,2 \cdot 10^{-7}$ до $7,4 \cdot 10^{-7}$ М
ГКС	$9,2 \cdot 10^{-7}$ до $6,9 \cdot 10^{-6}$ М	$1,4 \cdot 10^{-6}$ до $8,6 \cdot 10^{-6}$ М
ЭКС	$5,4 \cdot 10^{-10}$ до $8,6 \cdot 10^{-7}$ М	$3,4 \cdot 10^{-10}$ до $3,5 \cdot 10^{-7}$ М

**$\alpha$ -Нафтилуксусная кислота.** Для изучения особенностей действия brassinостероидов в смеси с ингибирующей дозой  $\alpha$ -нафтилуксусной кислоты была выбрана концентрация  $2,8 \cdot 10^{-2}$  М, а в качестве одного из БС – brassинолид. Диапазон концентраций brassинолида в опыте составил от  $1,9 \cdot 10^{-10}$  до  $1,0 \cdot 10^{-4}$  М, всего 60 вариантов. В результате исследования выявлено, что действие brassинолида в определенных диапазонах концентраций имеет стресс-протекторный характер, проявляющийся в ослаблении ингибирующего эффекта  $\alpha$ -НУК на рост проростков обеих культур (рисунок 4). В опыте со льном-долгунцом диапазон активных концентраций БЛ составил от  $3,4 \cdot 10^{-7}$  до  $2,8 \cdot 10^{-6}$  М, а с яровым ячменем – от  $5,1 \cdot 10^{-8}$  до  $2,3 \cdot 10^{-6}$  М.



**Рисунок 4 – Зависимость длины корня проростков льна-долгунца сорта Грант (А) и ярового ячменя сорта Радзіміч (Б) от БЛ при концентрации  $\alpha$ -нафтилуксусной кислоты  $2,8 \cdot 10^{-2}$  М**

Следует отметить видовую специфичность ростовой реакции двух культур: диапазон БЛ в опыте с яровым ячменем почти в два раза шире, чем аналогичный диапазон в опыте со льном-долгунцом, при этом в случае с яровым ячменем наблюдается более сильное адаптогенное действие brassинолида. Так, ослабление

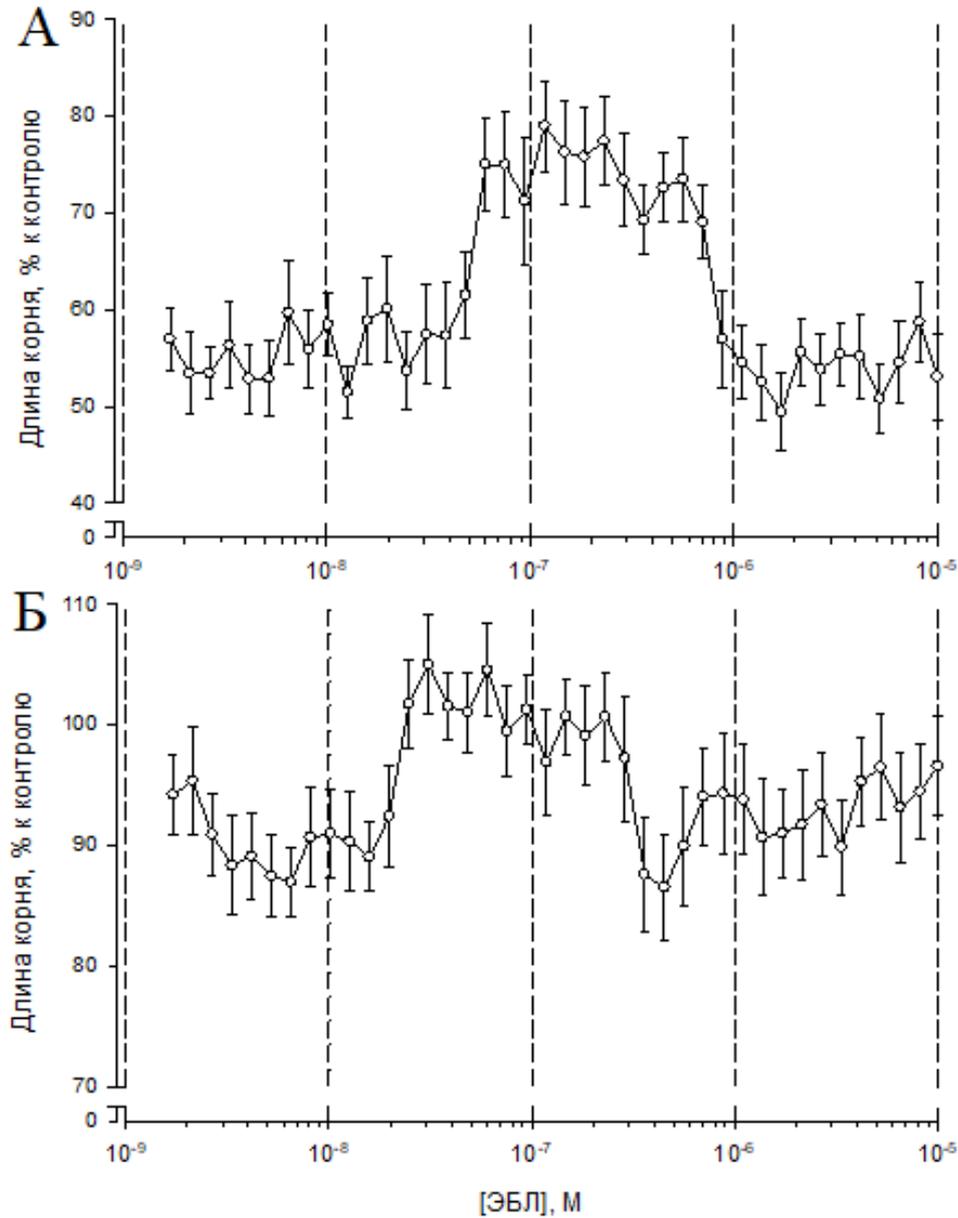
ингибирования роста корня в диапазоне активных концентраций БЛ у ярового ячменя составляет 23,6% (к контролю  $\alpha$ -НУК без БЛ), тогда как у льна-долгунца 19,1 %.

**Метсульфурон-метил.** Проведенный эксперимент по определению зависимости доза-эффект в действии гербицида метсульфурон-метила на проростки льна-долгунца и ярового ячменя выявил, что ингибирующее действие данный агент оказывает на лен-долгунец, тогда как ответной реакции корневой системы и надземной части проростков ярового ячменя не выявлено. В целом, это соответствует литературным данным об устойчивости злаковых культур к данному гербициду.

Для исследования влияния БС на проростки льна-долгунца в условиях стресса была выбрана концентрация метсульфурон-метила  $6 \cdot 10^{-5}$  М для сорта Грант и  $2 \cdot 10^{-4}$  М для сорта Ритм. Концентрации БС при инкрустации семян составляли от  $1,1 \cdot 10^{-8}$  до  $6,9 \cdot 10^{-5}$  М для ЭБЛ и  $1,8 \cdot 10^{-10}$  до  $1,0 \cdot 10^{-5}$  М для ЭКС.

Выявлен диапазон концентраций ЭБЛ, в котором наблюдалось ослабление гербицидного действия на рост корневой системы проростков льна-долгунца по сравнению с контролем без ЭБЛ. Данный диапазон составлял от  $8,5 \cdot 10^{-8}$  до  $5,1 \cdot 10^{-7}$  М у сорта Грант и  $1,3 \cdot 10^{-7}$  до  $1,0 \cdot 10^{-6}$  М у сорта Ритм. В опытах с эпикастастероном аналогичный диапазон был  $6,7 \cdot 10^{-9}$  –  $4,4 \cdot 10^{-7}$  М (сорт Грант) и  $1,3 \cdot 10^{-9}$  –  $5,5 \cdot 10^{-7}$  М (сорт Ритм). Он оказался шире, чем у эпибрасинолида, более чем в три раза. Надо отметить, что диапазоны, в которых наблюдается максимально выраженное протекторное действие БС на фоне стресса, вызванного метсульфурон-метилом, практически совпадают с выявленными в предыдущих исследованиях диапазонами БС на фоне действия стресса, индуцируемого N-фосфометилглицином.

**Засоление (NaCl).** Опытным путем была определена необходимая для экспериментов концентрация соли – 0,5%, ингибирующая рост проростков на 60% при постоянном выращивании на солевом растворе в течение девяти суток. Диапазон концентраций БС (эпибрасинолид) составил от  $1,7 \cdot 10^{-9}$  до  $1,0 \cdot 10^{-5}$  М для обеих культур. Установлено, что в определенном диапазоне концентраций, ЭБЛ оказывает выраженное протекторное действие, как на проростки ярового ячменя, так и на проростки льна-долгунца (рисунок 5). В опыте со льном-долгунцом диапазон активных концентраций ЭБЛ составил от  $5,9 \cdot 10^{-8}$  до  $6,9 \cdot 10^{-7}$  М, а с яровым ячменем от  $2,4 \cdot 10^{-8}$  до  $2,8 \cdot 10^{-7}$  М. По ширине данные диапазоны совпадают для двух изучаемых культур, однако диапазон активности ЭБЛ в опыте с яровым ячменем несколько сдвинут в область более низких концентраций. Ослабление ингибирования роста корня в выявленном диапазоне ЭБЛ у ярового ячменя составляет 27,9% (к контролю без ЭБЛ), у льна-долгунца 25,7%.



**Рисунок 5 – Зависимость длины корня проростков льна-долгунца (А) ярового ячменя (Б) от ЭБЛ при солевом стрессе**

Результаты выполненных исследований показали, что существуют диапазоны концентраций brassinостероидов различной химической структуры (лактонной или кетонной), в которых проявляется их протекторное действие в условиях стресса, вызванного химическими агентами (N-фосфонометилглицин,  $\alpha$ -нафтилуксусная кислота, метсульфурон-метил) и засолением (NaCl). Установленные диапазоны, независимо от стрессора и исследуемой культуры, находятся в пределах концентраций БС от  $10^{-10}$  до  $10^{-6}$  М, однако имеют разную ширину.

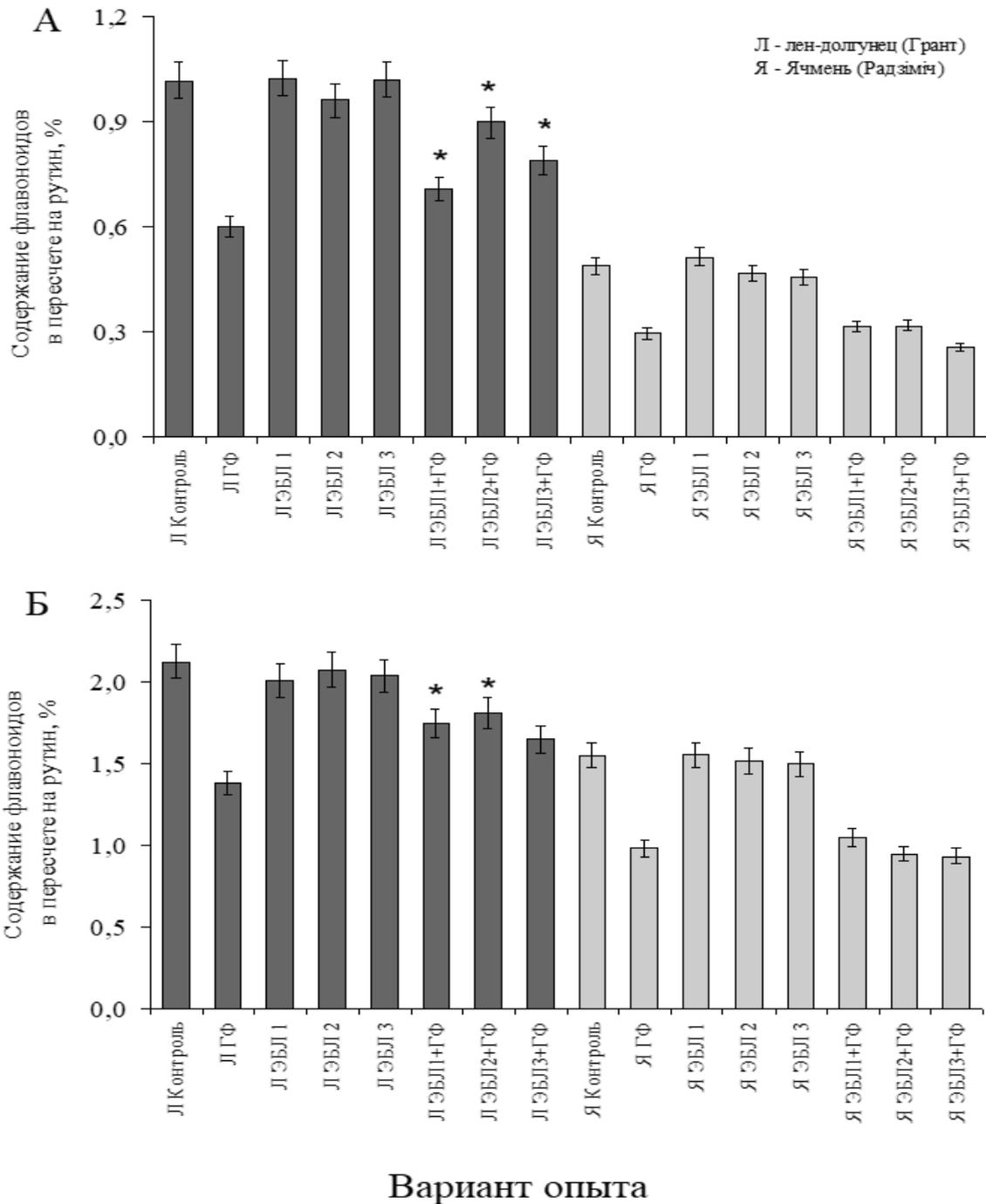
## Влияние смесей N-фосфометилглицина и эпибрасинолида на содержание флавоноидов

Известно, что гербицидное действие глифосата реализуется путем подавления активности ключевого фермента биосинтеза ароматических соединений 5-енолпирувил-шикимат-3-фосфат-синтазы (EPSPS). Было выдвинуто предположение, что протекторное действие брасиностероидов также связано с активностью этого фермента. Проведенные нами исследования зависимости доза-эффект в действии смесей глифосата и ЭБЛ в широком диапазоне концентраций на линейный рост проростков при инкрустации семян, позволили выделить на графике дозы ЭБЛ, соответствующие трем точкам: до интервала взаимодействия глифосата и ЭБЛ, внутри интервала и после интервала. Данные концентрации и были использованы в эксперименте. Объектами исследования были проростки льна-долгунца (сорт Грант) и ярового ячменя (сорт Радзіміч). Доза глифосата в опыте составила  $5,1 \cdot 10^{-4}$  М. Контроль-1 – обработка 1%-ным раствором Гисинара; контроль-2 – глифосат в концентрации  $5,1 \cdot 10^{-4}$  М без ЭБЛ. Исследуемые варианты были следующими: 1) ЭБЛ  $2,0 \cdot 10^{-8}$  М 2) ЭБЛ  $1,5 \cdot 10^{-7}$  М 3) ЭБЛ  $1,0 \cdot 10^{-6}$  М 4) ГФ + ЭБЛ  $2,0 \cdot 10^{-8}$  М 5) ГФ + ЭБЛ  $1,5 \cdot 10^{-7}$  М 6) ГФ + ЭБЛ  $1,0 \cdot 10^{-6}$  М.

У проростков льна-долгунца и ярового ячменя контроль-1 показал содержание флавоноидов в корнях на уровне 1,02%, у проростков ярового ячменя 0,49%; контроль-2 – 0,60% у льна и 0,29% у ячменя, т.е. глифосат существенно снижал данный показатель у обеих культур (рисунок 6). Содержание флавоноидов во всех вариантах с обработкой ЭБЛ без добавления глифосата, как в корнях, так и в надземной части, было на уровне контроля-1.

Самое высокое содержание флавоноидов в корнях (по отношению к контролю-2) среди вариантов со смесями ЭБЛ и ГФ выявлено в варианте, где концентрация ЭБЛ составляла  $1,5 \cdot 10^{-7}$  М (0,89% у льна-долгунца).

Для ярового ячменя содержание флавоноидов в вариантах с обработкой смесями ЭБЛ и ГФ не превышало данный показатель у контроля-2. Содержание флавоноидов в надземной части проростков у контроля-1 составило 2,12% (у льна-долгунца) и 1,55% (у ярового ячменя), у контроля-2 – 1,38% и 0,98% соответственно.



**Рисунок 6 – Содержание флавоноидов в корнях (А) и надземной части (Б) проростков льна-долгунца и ярового ячменя при обработке семян смесями ЭБЛ и глифосата**

Результаты исследования содержания флавоноидов согласуются с полученными ранее данными. Так для проростков льна-долгунца характерно значительное снятие ингибирующего эффекта ГФ на содержание флавоноидов за счет внесения в смеси ЭБЛ, тогда как для проростков ярового ячменя снижения ингибирования не выявлено.

## **Влияние N-фосфонометилглицина и его композиции с эпибрассинолидом на содержание шикимовой кислоты и ее производных**

Шикимовая кислота (ШК) является важнейшим интермедиатом в шикиматном пути биосинтеза ароматических соединений. Для изучения механизма действия брассиностероидов в стрессовых условиях методом ВЭЖХ было определено ее содержание в тканях проростков ярового ячменя и льна-долгунца, выращенных из семян, которые были инкрустированы глифосатом и его смесью с эпибрассинолидом. Контролем служил вариант без обработки.

Содержание ШК в листьях льна-долгунца составило в контроле  $1,89 \pm 0,13$  мкг/г сырой массы, в варианте с обработкой глифосатом оно возросло до  $6,27 \pm 0,08$  мкг/г, а в варианте ГФ+ЭБЛ снизилось в два раза до  $2,79 \pm 0,16$  мкг/г. В предшествующих исследованиях уже отмечалось, что добавление ЭБЛ в смесь ослабляет ингибирующий эффект гербицида на рост проростков данной культуры, поэтому зарегистрированное снижение накопления шикимата в варианте со смесью ГФ+ЭБЛ по сравнению с вариантом, где проводилась обработка чистым глифосатом, было ожидаемым. В опыте с яровым ячменем содержание ШК в листьях ярового ячменя составило:  $13,88 \pm 0,87$  мкг/г сырой массы в контроле,  $14,57 \pm 0,72$  мкг/г в варианте с ГФ и  $25,18 \pm 1,10$  мкг/г в варианте ГФ+ЭБЛ. Эти данные также соответствуют ранее выявленной закономерности, выраженной в усилении ингибирующего эффекта гербицида на линейный рост корневой системы и надземной части проростков данной культуры, а также на содержание флавоноидов в тканях при добавлении эпибрассинолида.

### **Брассиностероиды как возможные компоненты клеточных мембран**

Общепринято представление, что брассиностероиды являются одним из компонентов фитогормональной системы растений. При этом, в ряде тест-систем БС проявляли типичный эффект для того или иного гормона, в других же случаях обнаруживали противоположную направленность действия или вовсе не проявляли какого-либо фиксируемого эффекта. Такие противоречивые данные способствовали возникновению предположения о возможном эпигенетическом уровне влияния БС на физиолого-биохимические процессы в клетках растений.

Согласно полученным нами данным, во всех сериях экспериментов обнаруживается однотипность ростовых реакций на стрессоры различных химических групп, а также относительно низкие предельные значения превышения над контролем в вариантах, где различные по химической структуре БС используются на фоне стрессового фактора. Так, в каждом конкретном случае обнаруживалось, что протекторное действие БС было на уровне не более 25% (по

сравнению с контролем без БС), что может свидетельствовать о лимитированной возможности для реализации антистрессового потенциала (таблица 2).

Таблица 2 – Эффективность действия brassinosterоидов внутри диапазонов «активных концентраций» на фоне химического стресса

№ п.п.	Браcсиностероид	Показатели максимального усиления (+) или ослабления (-) ингибирующего эффекта N-фосфонометилглицина brassinosterоидами в сравнении с контролем (без БС) внутри диапазона «активных концентраций», %	
		Яровой ячмень (сорт Радзіміч)	Лен-долгунец (сорта Ласка и Грант)
1	Браcсинолид	-17,8	+13,8
2	Гомобраcсинолид	-20,0	+16,8
3	Эпибраcсинолид	-12,1	+20,9
4	Кастастерон	-16,7	+24,3
5	Гомокастастерон	-24,7	+19,2
6	Эпикастастерон	-18,1	+18,3

Этот факт согласуется с предположением о том, что протекторное действие БС осуществляется посредством эпигенетического изменения свойств и/или биохимического состава клеточных мембран, так как именно в этом случае антистрессовое действие БС будет ограничено пределами, в которых «от» и «до» может проявляться лабильность физиологического состояния мембран.

О негеномном действии brassinosterоидов может свидетельствовать также факт, что протекторная активность БС на фоне химических стрессов проявляется в узком диапазоне концентраций. К тому же, данные диапазоны практически совпадают при действии различных агентов (соль NaCl, N-фосфонометилглицин, метсульфурон-метил): активность БС проявляется в дозе  $10^{-8}$  –  $10^{-7}$  М, а изменение концентраций внутри диапазонов составляет от 6 до 11,7 раза. Предположительно, это обусловлено действием brassinosterоидов на клеточную мембрану – либо непосредственно на ее структурные компоненты, либо через функциональную регуляцию ионных каналов.

Стоит отметить, что объекты исследования генетически разнородны и, соответственно, имеют различные защитные механизмы, направленные на противостояние неблагоприятным факторам. Однако в наших исследованиях выявлена идентичная реакция растений на стрессоры химической природы в присутствии БС. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в данном случае генетические различия не имеют определяющего значения, а действие БС осуществляется на эпигенетическом уровне, посредством изменения свойств и состояний клеточных мембран. Такие изменения всегда имеют определенные пределы, обусловленные физиологическими возможностями растительной клетки.

Поэтому негеномное действие БС в таких случаях будет строго детерминировано, что и подтверждается результатами проведенных экспериментов.

### **Влияние brassinosteroid-содержащих композиций на формирование элементов продуктивности льна-долгунца и качество льноволокна**

Было выдвинуто предположение, что мультикомпонентные смеси, содержащие brassinosteroids,  $\alpha$ -НУК и глифосат (в горметической дозе) могут оказывать положительное влияние на урожайность и качество льнотресты. Это обусловлено тем, что каждый из компонентов воздействует на определенные биохимические процессы в клетках растений. Так, brassinosteroids выполняют стресспротекторную функцию, защищая растение от неблагоприятных факторов среды;  $\alpha$ -нафтилуксусная обладает ауксиноподобным действием и стимулирует рост за счет растяжения клеток, что особенно важно для получения высокого выхода длинного волокна; а глифосат, гербицидное действие которого осуществляется посредством блокировки шикиматного пути биосинтеза ароматических соединений, соответственно способствует снижению содержания лигнина в тканях растений, накопление которого негативно сказывается на качественных характеристиках льноволокна.

Исследование по изучению влияния композиций, включающих природные малотоксичные фитогормональные стимуляторы роста растений и N-фосфометилглицин в низкой негербицидной (стимулирующей рост) концентрации на урожайность и качество льноволокна проводили в течение трех лет с 2020 по 2022 год на базе РУП «Институт льна», аг. Устье, Оршанского района Витебской области.

Таблица 3 – Схемы опытов в трехгодичном эксперименте

№	2020 год	2021 год	2022 год
1	Контроль (обработка водой)	Контроль (обработка водой)	Контроль (обработка водой)
2	Глифосат д.в. 6 г/га	Глифост д.в. 6 г/га	$\alpha$ -НУК 150 г/га
3	$\alpha$ -НУК 100 г/га	$\alpha$ -НУК 100 г/га	Эпибрассинолид 30 мг/га
4	Эпибрассинолид 30 мг/га	Эпибрассинолид 30 мг/га	Эпикастастерон 15 мг/га
5	Смесь ЭБЛ 30 мг/га + ГФ 6 г/га + $\alpha$ -НУК 100 г/га	Смесь ЭБЛ 30 мг/га + ГФ 6 г/га + $\alpha$ -НУК 100 г/га	Смесь ЭБЛ 30 мг/га + ГФ 10 г/га + $\alpha$ -НУК 150 г/га
6	Смесь ЭБЛ 30 мг/га + ГФ 6 г/га + $\alpha$ -НУК 100 г/га	Смесь ЭБЛ 30 мг/га + ГФ 10 г/га + $\alpha$ -НУК 150 г/га	Смесь ЭКС 15 мг/га + $\alpha$ -НУК 150 г/га
7	–	–	Смесь ЭКС 15 мг/га + ГФ 10 г/га + $\alpha$ -НУК 150 г/га

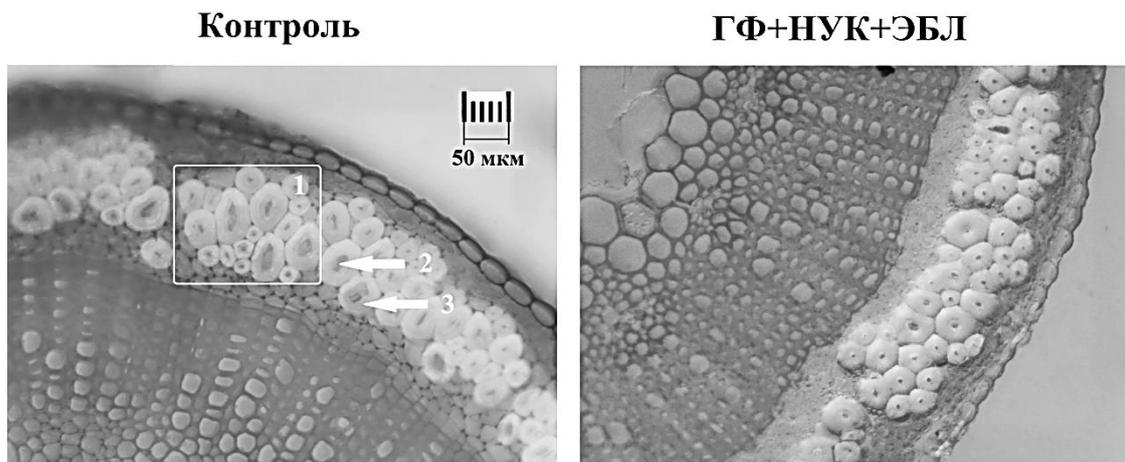
В 2020 году обработка смесью ЭБЛ + ГФ +  $\alpha$ НУК (30 мг/га + 6 г/га + 100 г/га), вариант №6 (таблица 2), превосходила показатели контрольного и других вариантов

по толщине стенки элементарного волокна (+2,5 мкм), количеству элементарных волокон в пучке (+3,3 шт.), урожайности льноволокна (+1,5 ц/га), урожайности длинного волокна (+1,3 ц/га), разрывной нагрузке (+69,3% к контролю), урожайности льносемян (+1,2 ц/га).

В 2021 году этот же вариант, но под номером 5, смесь ЭБЛ + ГФ + αНУК (30 мг/га + 6 г/га + 100 г/га) превосходил показатели контрольного и других вариантов по толщине коры (+7,8 мкм), соотношению коры и древесины, толщине стенки элементарного волокна (+1 мкм), количеству элементарных волокон в пучке (+5,2 шт.), урожайности льноволокна (+1,4 ц/га) и гибкости (+3 мм к контролю).

В 2022 году вариант с таким же компонентным составом и близкими концентрациями №5 – смесь ЭБЛ + ГФ + αНУК (30 мг/га + 10 г/га + 150 г/га) также характеризовался лучшими суммарными показателями по ряду признаков: толщине коры (+15,9 мкм), соотношению коры и древесины, толщине стенки элементарного волокна (+2,2 мкм), количеству элементарных волокон в пучке (+4,8 шт), урожайности льноволокна (+2,6 ц/га), урожайности длинного волокна (+1,6 ц/га), горстевой длине (+3 см к контролю) и урожайности льносемян (+2,2 ц/га).

Отличия анатомического строения стебля растений льна при применении стимулирующей композиции от контрольного варианта представлены на рисунке 7.



**Рисунок 7 – Различия в строении пучков элементарного волокна в контрольном варианте и при применении brassinosteroid-содержащей композиции: 1 – пучок технического волокна, 2 – полость элементарного волокна, 3 – стенка элементарного волокна**

Экспериментальные данные подтверждают, что трехкомпонентная смесь имеет наиболее выраженное положительное действие на растения льна-долгунца. При анализе полученных данных заметно, что в разные годы действие смеси ЭБЛ + ГФ + αНУК несколько отличается, но во всех случаях наблюдается стимуляция параметров, характеризующих урожайность и качество конечной продукции. Таким образом, результаты исследований, проведенных в длительном полевом опыте, показывают, что обработка льна-долгунца в фазу елочки ростостимулирующей

композицией ЭБЛ + ГФ +  $\alpha$ НУК в дозе 30 мг/га + 6 г/га + 100 г/га приводит к увеличению урожайности льноволокна (на 1,4–2,6 ц/га по сравнению с контролем) и повышению его качества, особенно разрывной нагрузки (прочности). Под действием смеси также увеличивалась урожайность льносемян на 1,2–2,2 ц/га. Следовательно, применение изученной композиции можно рекомендовать как на производственных участках при выращивании сырья, так и в семеноводческих хозяйствах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что графическое отображение кривой концентрационной зависимости при действии химических стрессоров на проростки растений можно разделить на 4 зоны по типу ростовой реакции корневой системы: зона гормезиса (стимуляции роста), зона умеренного ингибирования роста, зона сильного ингибирования ростовых процессов, зона полной остановки роста проростков. Чувствительность различных культур и сортов может варьироваться, это наиболее заметно по величинам концентраций, с которых начинается зона резкого ингибирования ростовых процессов для каждого из стрессоров. *Зона стимуляции* отмечена только для N-фосфометилглицина: у льна-долгунца (Ласка) от  $8,1 \cdot 10^{-6}$  М до  $1,9 \cdot 10^{-5}$  М, ярового ячменя сорта Радзіміч от  $1,3 \cdot 10^{-5}$  М до  $3,9 \cdot 10^{-5}$  М и от  $1,9 \cdot 10^{-5}$  М до  $7,5 \cdot 10^{-5}$  М у сорта Фэст. *Зона сильного ингибирования*: 1) для N-фосфометилглицина начинается от концентрации  $4,1 \cdot 10^{-4}$  М и выше у озимого рапса сорта Зорны,  $5,1 \cdot 10^{-4}$  у льна-долгунца сорта Веста и  $2,8 \cdot 10^{-4}$  М у сорта Ласка, от  $3,6 \cdot 10^{-4}$  М у ярового ячменя сорта Фэст и  $5,1 \cdot 10^{-4}$  М у сорта Радзіміч; 2) для метсульфурон-метила от концентрации  $1,8 \cdot 10^{-6}$  М у льна-долгунца сорта Грант и  $8,5 \cdot 10^{-6}$  М у сорта Ритм; 3) не выделена для  $\alpha$ -нафтилуксусной кислоты – снижение роста корня идет плавно при нарастании концентраций [1–А, 7–А, 8–А, 9–А, 22–А].

2. Показано, что ростовые процессы надземной части проростков льна-долгунца и ярового ячменя обладают значительно меньшей восприимчивостью к воздействию химического стресса, чем корневая система (в условиях девятидневного эксперимента). Так, в экспериментах с N-фосфометилглицином лен-долгунец показал незначительные изменения длины гипокотилей во всем диапазоне концентраций, использованных в эксперименте; у ярового ячменя отмечалось ингибирование роста надземной части проростков, но при концентрациях значительно более высоких, чем те, при которых происходило угнетение корневой системы. Сходная реакция наблюдалась и при стрессе, вызванном  $\alpha$ -нафтилуксусной кислотой: концентрация, при которой начиналось угнетение роста надземной части проростков ярового ячменя была выше и составляла  $9,0 \cdot 10^{-3}$  М, у корневой системы –  $4,6 \cdot 10^{-3}$  М. Также сильно отличалась выраженность ингибирующего эффекта – длина надземной части проростков в варианте с самой высокой из исследованных

концентраций была меньше контрольного значения на 32%, в то время как длина корневой системы на 65% [2–А, 9–А, 10–А, 27–А].

3. Отмечено, что brassinosterоиды в широком диапазоне концентраций не оказывали выраженного стимулирующего или ингибирующего воздействия на проростки льна-долгунца и ярового ячменя в оптимальных условиях роста при девятидневном лабораторном эксперименте. Показатели длины корневой системы и надземной части проростков находились на уровне контрольного варианта или в пределах стандартной ошибки опыта [3–А, 11–А].

4. Установлено, что эффекты действия N-фосфометилглицина в ингибирующей дозе в смеси с brassinosterоидами выявляются в узком диапазоне концентраций БС, в пределах которого они, в зависимости от видовой принадлежности растений, усиливают (у ярового ячменя) или ослабляют (у льна-долгунца и озимого рапса) гербицидное действие глифосата на рост корневой системы проростков. При этом, диапазон «активных концентраций» для каждого из БС практически совпадал по ширине и локализации, несмотря на диаметрально противоположное действие на рост различных культур. Так, данные диапазоны составили у brassinosterоидов *лактонной группы*: brassинолид  $3,3 \cdot 10^{-8} - 3,4 \cdot 10^{-7}$  М (ячмень),  $5,1 \cdot 10^{-8} - 3,4 \cdot 10^{-7}$  М (лен) [3–А, 17–А], гомобраинолид  $1,0 \cdot 10^{-9} - 1,5 \cdot 10^{-8}$  М (ячмень),  $1,0 \cdot 10^{-9} - 9,4 \cdot 10^{-9}$  М (лен) [3–А, 13–А, 27–А], эпибраинолид  $4,7 \cdot 10^{-8} - 2,8 \cdot 10^{-7}$  М (ячмень),  $5,9 \cdot 10^{-8} - 4,4 \cdot 10^{-7}$  М (лен) [2–А, 12–А, 18–А]; у brassinosterоидов *кетонной группы*: кастастерон  $4,1 \cdot 10^{-8} - 5,9 \cdot 10^{-7}$  М (ячмень),  $1,2 \cdot 10^{-7} - 7,4 \cdot 10^{-7}$  М (лен) [17–А], гомокастастерон  $9,2 \cdot 10^{-7} - 6,9 \cdot 10^{-6}$  М (ячмень),  $1,4 \cdot 10^{-6} - 8,6 \cdot 10^{-6}$  М (лен) [20–А] и эпикастастерон  $5,4 \cdot 10^{-10} - 8,6 \cdot 10^{-7}$  М (ячмень),  $3,4 \cdot 10^{-10} - 3,5 \cdot 10^{-7}$  М (лен) [18–А]. Самым широким диапазоном обладал эпикастастерон, а более смещенным в сторону низких концентраций – гомобраинолид [2–А, 3–А, 14–А, 15–А, 16–А, 21–А].

5. Подтвержден факт накопления шикимовой кислоты в тканях растений, выращенных из семян, инкрустированных глифосатом. Содержание ШК в листьях льна-долгунца составило в контроле  $1,89 \pm 0,13$  мкг/г сырой массы и  $13,88 \pm 0,87$  мкг/г у ярового ячменя; в варианте с обработкой глифосатом оно возросло до  $6,27 \pm 0,08$  мкг/г у льна-долгунца и до  $14,57 \pm 0,72$  мкг/г у ячменя. Подтвержден факт накопления шикимовой кислоты в тканях растений, выращенных из семян, инкрустированных глифосатом. При внесении в инкрустационную смесь эпибраинолида установлено значительное снижение этого показателя у льна-долгунца ( $2,79 \pm 0,16$  мкг/г) и повышение их накопления у проростков ярового ячменя ( $25,18 \pm 1,1$  мкг/г) [3–А, 24–А]. Противоположное влияние имело применение аналогичных агентов на содержание фенольных соединений, в частности флавоноидов. Применение глифосата снижало данный показатель по сравнению контролем, а добавление в смесь БС снимало ингибирующий эффект у проростков льна-долгунца и не оказывало воздействия на количество флавоноидов у ярового ячменя [29–А]. Самое высокое содержание флавоноидов в корнях среди вариантов со смесями ЭБЛ и ГФ

выявлено в варианте, где концентрация ЭБЛ составляла  $1,5 \cdot 10^{-7}$  М (0,89% у льна-долгунца). Следовательно, природа модифицирующего действия brassinosteroidов на рост проростков при стрессе, вызванном глифосатом, связана с влиянием данных агентов на один и тот же этап шикиматного пути биосинтеза ароматических соединений – превращение шикиматов в хоризматы [4–А, 19–А, 23–А, 25–А, 26–А, 28–А].

6. Анализ полученного экспериментального материала показывает, что вне зависимости от вида растения, химической структуры стероидов и природы химического стресса диапазоны концентраций БС, в которых проявляется их модифицирующее действие на рост проростков, практически совпадают [3–А, 5–А, 11–А, 13–А, 17–А, 21–А, 30–А]. Это позволяет предположить, что особенности регуляции brassinosteroidами физиолого-биохимических процессов в клетке могут быть обусловлены не только их фитогормональной активностью, но и выполнением роли структурных компонентов клеточных мембран. В этом случае brassinosteroidы, наряду с другими стеринами, могут определять их текучесть и проницаемость, вызывать изменения в работе ионных каналов и сигнальных путей, тем самым реализуя свои эффекты через негеномный путь [7–А].

7. Данные, полученные в полевых опытах показывают, что обработка растений льна-долгунца в фазу ёлочка композицией, включающей эпибрассинолид, N-фосфонометилглицин и  $\alpha$ -нафтилуксусную кислоту, имеет выраженное положительное влияние на формирование флоэмных элементов стебля – увеличивается количество волокон в пучке и толщина стенки элементарного волокна, что повышает прочность льноволокна на разрыв в 1,5–1,7 раза. Также применение композиции ЭБЛ + ГФ +  $\alpha$ НУК в дозе 30 мг/га + 6 г/га + 100 г/га повышает урожайность льноволокна на 1,4–2,6 ц/га и льносемян на 1,2–2,2 ц/га по сравнению с контрольным вариантом [6–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Полученные в ходе исследований данные показали, что тест-система, основанная на оценке ростовых параметров корневых систем девятидневных проростков растений на фоне действия химического стресса, позволяет осуществлять воспроизводимую с высокой степенью достоверности оценку ростовой активности природных и синтетических brassinosteroidов. Это открывает перспективы использования результатов исследования в научной практике.

2. Для повышения качества льноволокна и урожайности льносемян предлагается использовать композицию ЭБЛ + ГФ +  $\alpha$ НУК в дозе 30 мг/га + 6 г/га + 100 г/га в виде опрыскивания вегетирующих растений льна-долгунца в фазу ёлочка. Применение такой смеси приводит к увеличению урожайности льноволокна на 1,4–2,6 ц/га и повышению его прочности. Урожайность льносемян возрастает на 1,2–2,2 ц/га (акт полевых испытаний от 17 января 2024 года; заявка на патент «Способ

повышения урожайности и качества волокна льна-долгунца», регистрационный номер а20240100 от 29 апреля 2024 года).

3. Экспериментальный материал, указывающий на возможное участие brassinosteroidов в регулировании физиолого-биохимических процессов растений в качестве структурных компонентов клеточной мембраны, имеет важное фундаментальное значение для дальнейших исследований функций brassinosteroidов в растительной клетке и растениях в целом.

4. Результаты исследования внедрены в учебный процесс ОП «Ляховичский аграрный колледж» УО «Барановичский государственный университет», что подтверждается двумя актами о практическом использовании (протокол № 7 от 09.02.2023г.).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных изданиях, включенных в перечень изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1—А. Ламан, Н. А. Ростовые реакции проростков отдельных видов и сортов сельскохозяйственных растений на обработку семян глифосатом (N-фосфонометилглицином) / Н. А. Ламан, **К. Р. Кем**, А. Ф. Судник // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2016. – № 4. – С. 7–13.

2—А. Ламан, Н. А. Влияние инкрустации семян смесями N-фосфонометилглицина и эпибрасинолида на рост растений / Н. А. Ламан, **К. Р. Кем**, В. А. Хрипач, А. Ф. Судник // Доклады Нац. акад. наук Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 6. – С. 84–90.

3—А. **Кем, К. Р.** Фитогормональная активность брасиностероидов лактонной структуры в условиях химического стресса у растений / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, Н. А. Копылова, В. А. Хрипач // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 186–193.

4—А. **Кем, К. Р.** Влияние эпибрасинолида на содержание флавоноидов в проростках растений в условиях стресса, вызванного N-фосфонометилглицином / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2021. – Т. 67, № 3. – С. 277–281.

5—А. Ламан, Н. А. Особенности действия брасиностероидов на растения в условиях солевого стресса / Н. А. Ламан, **К. Р. Кем**, В. И. Аникеев, В. Н. Жабинский, Н. Б. Хрипач // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 2. – С. 199–205.

6—А. **Кем, К. Р.** Влияние брасиностероид-содержащих композиций на формирование элементов продуктивности льна-долгунца и качество льноволокна / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, В. А. Хрипач, Е. В. Черехухина // Ботаника (исследования) : сборник научных трудов. / Ин-т эксперимент. бот. НАН Беларуси. – Минск, 2023. – Вып. 52. – С. 247–252.

7—А. **Кем, К. Р.** О возможном эпигенетическом механизме влияния брасиностероидов на физиолого-биохимические процессы в растениях / К. Р. Кем, Н. А. Ламан // Ботаника (исследования) : сборник научных трудов. / Ин-т эксперимент. бот. НАН Беларуси. – Минск, 2024. – Вып. 53. – С. 268–274.

### Статьи в сборниках материалов конференций

8—А. Ламан, Н. А. Исследование зависимости «доза–эффект» по реакции роста проростков при обработке семян 6-фосфонометилглицином (глифосатом) / Н. А. Ламан, **К. Р. Кем**, В. А. Хрипач, А. Ф. Судник // Регуляция роста, развития и продуктивности растений: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–30 октября 2015 г. / НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича,

Белорус. обществ. объединение физиологов растений; науч. ред. Н. А. Ламан. – Минск : Колоград, 2015. – С. 69.

9–А. **Кем, К. Р.** Сортовая специфичность ростовой реакции растений льна-долгунца на инкрустацию семян 6-фосфонометилглицином / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, А. Ф. Судник // Регуляция роста, развития и продуктивности растений: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–30 октября 2015 г. / НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича, Беларус. обществ. объединение физиологов растений; науч. ред. Н. А. Ламан. – Минск : Колоград, 2015. – С. 54.

10–А. **Кем, К. Р.** Исследование влияния малых доз 6-фосфонометилглицина (глифосата) на рост проростков ярового ячменя / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, А. Ф. Судник // Регуляция роста, развития и продуктивности растений: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–30 октября 2015 г. / НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича, Беларус. обществ. объединение физиологов растений; науч. ред. Н. А. Ламан. – Минск : Колоград, 2015. – С. 53.

11–А. Ламан, Н. А. Влияние эпибрасинолида в широком диапазоне концентраций на рост проростков растений / Н. А. Ламан, **К. Р. Кем**, В. А. Хрипач, А. Ф. Судник // Регуляция роста, развития и продуктивности растений: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–30 октября 2015 г. / НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В. Ф. Купревича, Беларус. обществ. объединение физиологов растений; науч. ред. Н. А. Ламан. – Минск: Колоград, 2015. – С. 68.

12–А. Laman, N. A. Species-specificity of plant-growth response to combined application of N-phosphonomethyl glycine and epibrassinolide / N. A. Laman, **К. Р. Кем**, A. F. Sudnik // 23rd Conference on Isoprenoids, Minsk, September 4–7, 2016: Весці НАН Беларусі. Серыя хімічных навук. – Минск, 2016. – №3. – С.79–80.

13–А. **Кем, К. Р.** Видовая специфичность ростовых реакций проростков на инкрустацию семян смесями глифосата и эпибрасинолида / **К. Р. Кем** // Молодежь в науке – 2016: сборник материалов Междунар. конф. молодых ученых (Минск, 22–25 ноября 2016 г.) В 2 ч. Ч 2. Биологические, гуманитарные, медицинские, физико-математические, физико-технические, химические науки / Нац. акад. Наук Беларуси. Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2017. – С. 31–36.

14–А. **Кем, К. Р.** Особенности действия смесей N-фосфонометилглицина и гомобрасинолида на рост проростков растений при инкрустации семян / **К. Р. Кем** // Молодежь в науке – 2017 : сборник материалов Междунар. конф. молодых ученых (Минск, 30 октября – 2 ноября 2017 г.). В 2 ч. Ч. 1. Аграрные, биологические науки / Нац. акад. наук Беларуси. Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2017. – С. 329–335.

15–А. **Кем, К. Р.** Зависимость «доза-эффект» в ростовой реакции проростков ярового ячменя при обработке семян смесями глифосата и брасиностероидов / **К. Р. Кем** // IV (XII) Международная ботаническая конференция молодых учёных : сб.

материал., Санкт-Петербург, 22–28 апр. 2018 г. / Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова РАН ; редкол.: Д. В. Гельтман (предс.) [и др.]. – СПб., 2018. – С. 171.

16–А. Laman, N. Root growth response of spring barley seedlings to the combined glyphosate-brassinosteroid treatment of seed / N. Laman, **К. Кем**, N. Chaschina // Book of Abstracts of the VI International conference «Chemistry, structure and function of biomolecules» Minsk, May 22–25, 2018. / ИВОСН. – Minsk, 2018. – P.107–110.

17–А. Laman, N. The effect of seed treatment with brassinosteroid-glyphosate mixtures on root growth in fiber flax and spring barley seedlings / N. Laman, **К. Кем**, V. Zhabinskii // Book of Abstracts of the 24<sup>th</sup> Conference on Isoprenoids, Bialystok, September 9–12, 2018. / University of Bialystok. – Bialystok, 2018. – P. 109.

18–А. **Кем, К. Р.** Ростовая реакция корневой системы проростков льна-долгунца при инкрустации семян смесями глифосата с кастастероном или брассинолидом / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, А. Л. Гурский // Регуляция роста, развития и продуктивности растений : материалы IX Междунар. научн. конф., Минск, 24–26 окт. 2018 г. / Ин-т экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси ; редкол.: А. Ф. Судник [и др.]. – Минск, 2018. – С. 60.

19–А. **Кем, К. Р.** Влияние обработки семян смесями глифосата с эпикастастероном или эпибрассинолидом на рост корневой системы проростков ярового ячменя и льна-долгунца / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, А. Ф. Судник, Н. М. Чашина // Регуляция роста, развития и продуктивности растений : материалы IX Междунар. научн. конф., Минск, 24–26 окт. 2018 г. / Ин-т экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси ; редкол.: А. Ф. Судник [и др.]. – Минск, 2018. – С. 61.

20–А. **Кем, К. Р.** Влияние инкрустации семян смесями глифосата и эпибрассинолида на содержание фенольных соединений у растений / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, В. Н. Жабинский // Регуляция роста, развития и продуктивности растений : материалы IX Междунар. научн. конф., Минск, 24–26 окт. 2018 г. / Ин-т экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси ; редкол.: А. Ф. Судник [и др.]. – Минск, 2018. – С. 62.

21–А. **Кем, К. Р.** Glyphosate-epibrassinolide composition action on the flavonoids' content in plants / **К. Р. Кем**, N. A. Laman, V. A. Khripach, V. N. Zhabinskii // International Scientific Conference «Plants Stress and Adaptation», February 25-26, 2021. / The bulletin of Kharkiv national agrarian University Series biology. Special issue. – Kharkiv, 2021. – P. 194–195.

22–А. **Кем, К. Р.** The effect of brassinosteroids of different chemical structure on plant growth under chemical stress / **К. Р. Кем**, N. A. Laman, V. A. Khripach, V. N. Zhabinskii // International Scientific Conference «Plants Stress and Adaptation», February 25-26, 2021. / The bulletin of Kharkiv national agrarian University Series biology. Special issue. – Kharkiv, 2021. – P. 196–197.

23–А. **Кем, К. Р.** The growth response of the root system of fiber flax seedlings on seed incrustation by metsulfuron-methyl / **К. Р. Кем**, N. A. Laman, V. A. Khripach / Book of Abstracts of the VII International conference on Chemistry, structure and function of biomolecules. Minsk, November 23-25, 2021. / ИВОСН. – Minsk, 2021. – P. 40.

24–А. **Кем, К. Р.** Влияние эпибрасинолида на содержание флавоноидов в проростках льна долгунца и ярового ячменя в условиях стресса, обусловленного глифосатом / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан // Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты: материалы докладов XI международного симпозиума. Москва 11–15 апреля 2022 (Институт физиологии растений РАН). – Москва, 2022. – С. 113.

25–А. **Кем, К. Р.** Изменение содержания шикимовой кислоты в тканях проростков льна-долгунца и ярового ячменя под влиянием глифосата и эпибрасинолида / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан, Н. А. Копылова // Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты: материалы докладов XI международного симпозиума. Москва 11–15 апреля 2022 (Институт физиологии растений РАН). – Москва, 2022. – С. 114.

26–А. **Кем, К. Р.** Влияние гомокастастерона на содержание флавоноидов в проростках ярового ячменя и льна-долгунца в условиях химического стресса / **К. Р. Кем** // Материалы V (XIII) Международной ботанической конференции молодых учёных в Санкт-Петербурге (25–29 апреля 2022 года). / Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова РАН ; редкол.: Д. В. Гельтман [и др.]. – СПб., 2022. – С. 109–110.

### **Тезисы докладов конференций**

27–А. **Кем, К. Р.** Видовая специфичность ростовых реакций проростков на инкрустацию семян смесями N-фосфонометилглицина и гомокастастерона в широком диапазоне концентраций / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан // Растительное разнообразие: состояние, тренды, концепция сохранения: Тезисы докладов Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, Новосибирск, 30 сентября – 3 октября 2020 г. / Новосибирск : Академиздат, 2020. – С. 75.

28–А. **Кем, К. Р.** Особенности действия гомобрасинолида на рост проростков льна-долгунца в стрессовых условиях / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан // Растительное разнообразие: состояние, тренды, концепция сохранения: Тезисы докладов Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, Новосибирск, 30 сентября – 3 октября 2020 г. / Новосибирск : Академиздат, 2020. – С. 76.

29–А. **Кем, К. Р.** Влияние эпибрасинолида на содержание флавоноидов в проростках льна-долгунца и ярового ячменя в условиях химического стресса / **К. Р. Кем**, Н. А. Ламан // Устойчивость растений и микроорганизмов к неблагоприятным факторам среды : тезисы докладов VI Всероссийской научной конференции с международным участием. Иркутск, Большое Голоустное, 3–7 июля 2023 г. / СИФИБР СО РАН ; отв. ред. В. К. Войников. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2023. – С. 42.

30–А. **Кем, К. Р.** Адаптогенная активность синтетического аналога эпибрасинолида на проростках растений при солевом стрессе // **К. Р. Кем, Н. А. Ламан** // Т. 1. Химия и технология растительных веществ: Тезисы докладов XIII Международной научной конференции со школой молодых ученых. Сыктывкар (28 мая – 1 июня 2024 г.) / Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2024. – С. 88.

## РЕЗЮМЕ

Кем Карина Робертовна

### **Физиолого-биохимические особенности действия brassinosterоидов на рост растений в условиях стресса**

**Ключевые слова:** рост и развитие растений, brassinosterоиды, гормезис, химический стресс, доза-эффект, ингибирование, диапазон активности, протекторное действие, флавоноиды, шикимовая кислота, brassinosterоид-пестицидные композиции, качество льноволокна

**Цель работы:** изучить физиологические эффекты малых доз brassinosterоидов и ряда гербицидов, а также их композиций на растительные организмы; выявить зависимость доза-эффект в действии brassinosterоидов и brassinosterоид-гербицидных смесей на рост корневой системы проростков, урожайность и качество продукции льна-долгунца.

**Методы исследования:** рулонный метод выращивания растений, биометрические, спектрофотометрия, световая микроскопия, ВЭЖХ, полевые, приборный анализ качества льноволокна.

**Полученные результаты и их новизна:** установлено существование узких диапазонов активности БС, в которых они способны усиливать или ослаблять гербицидное действие глифосата на растения в зависимости от их видовой принадлежности. Показано, что диапазоны активности, проявляющиеся на фоне химического стресса, практически совпадают по культурам и сортам для каждого из brassinosterоидов. Снижение накопления шикиматов в проростках льна-долгунца и повышение их накопления у ярового ячменя при внесении ЭБЛ в смесь с глифосатом свидетельствует о том, что действие обоих агентов осуществляется посредством влияния на активность ключевого фермента (5-енолпирувил-шикимат-3-фосфат-синтазы) шикиматного пути биосинтеза ароматических соединений. Особенности регуляции биохимических процессов в клетке могут быть связаны с выполнением brassinosterоидами роли структурных компонентов клеточной мембраны и их влиянием на динамику ее состояний.

**Рекомендации по использованию:** полученные данные могут использоваться при биотестировании активности природных и синтетических растительных стероидов; применение brassinosterоид-пестицидной композиции ГФ +  $\alpha$ -НУК + ЭБЛ (6 г/га + 100 г/га + 30 мг/га) на растениях льна-долгунца можно рекомендовать как прием для повышения качества льноволокна и в семеноводстве.

**Область применения:** физиология и биохимия растений, химия стероидов, промышленное льноводство.

## РЭЗІЮМЭ

Кем Карына Робертаўна

### **Фізіёлага-біяхімічныя асаблівасці дзеяння брасінастэроідаў на рост раслін ва ўмовах стрэсу**

**Ключавыя словы:** рост і развіццё раслін, брасінастэроіды, гармезіс, хімічны стрэс, доза-эфект, інгібіраванне, дыяпазон актыўнасці, пратэктарнае дзеянне, флаваноіды, шыкімавая кіслата, брасінастэроід-пестыцыдныя кампазіцыі, якасць ільновалакна

**Мэта працы:** вывучэнне фізіялагічных эфектаў малых доз брасінастэроідаў і шэрагу гербіцыдаў, а таксама іх кампазіцый на раслінныя арганізмы; выявіць залежнасць доза-эфект у дзеянні брасінастэроідаў і брасінастэроід-гербіцыдных сумесяў на рост каранёвай сістэмы праросткаў, ўраджайнасць і якасць прадукцыі ільну-даўгунцу.

**Метады даследавання:** рулонны метады вырошчвання раслін, біаметрычныя, спектрафотаметрыя, светлавая мікраскапія, ВЭВХ, палявыя, прыборны аналіз якасці ільновалакна.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** ўстаноўлена існаванне вузкіх дыяпазонаў актыўнасці БС, у якіх яны здольныя ўзмацняць або аслабляць гербіцыднае дзеянне гліфасату на расліны ў залежнасці ад іх відавай прыналежнасці. Адзначана, што дыяпазоны актыўнасці, якія праяўляюцца на фоне хімічнага стрэсу, практычна супадаюць па культурах і гатунках для кожнага з брасінастэроідаў. Зніжэнне назапашвання шыкіматаў у праростках ільну-даўгунцу і павышэнне іх назапашвання ў яравога ячменю пры унясенні ЭБЛ у сумесь з гліфасатам сведчыць аб тым, што дзеянне абодвух агентаў ажыццяўляецца з дапамогай уплыву на актыўнасць ключавога фермента (5-енолпірувил-шыкімат-3-фасфат-сінтазы) шыкіматнага шляху біясінтэзу араматычных злучэнняў. Асаблівасці рэгуляцыі біяхімічных працэсаў у клетцы могуць быць звязаны з выкананнем брасінастэроідамі ролі структурных кампанентаў клеткавай мембраны і іх уплывам на дынаміку яе станаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** атрыманыя дадзеныя могуць выкарыстоўвацца пры біятэставанні актыўнасці прыродных і сінтэтычных раслінных стэроідаў; прымяненне брасінастэроід-пестыцыднай кампазіцыі ГФ +  $\alpha$ -НУК + ЭБЛ (6 г/га + 100 г/га + 30 мг/га на раслінах ільну-даўгунцу можна рэкамендаваць як прыём для павышэння якасці ільновалакна і ў насенняводстве.

**Галіна выкарыстання:** фізіялогія і біяхімія раслін, хімія стэроідаў, прамысловае ільнаводства.

## SUMMARY

Kem Karyna Robertovna

### **Physiological and biochemical features of the effect of brassinosteroids on plant growth under stress conditions**

**Key words:** plant growth and development, brassinosteroids, hormesis, chemical stress, dose-effect, inhibition, range of activity, protective effect, flavonoids, shikimic acid, brassinosteroid-pesticide compositions, flax fiber quality

**The purpose of the research :** to study the physiological effects of small doses of brassinosteroids and a number of herbicides, as well as their compositions, on plant organisms; to reveal the dose-effect relationship in the action of brassinosteroids and brassinosteroid-herbicide mixtures on the seedlings root system growth, the yield and quality of fiber flax.

**Methods:** roll method of growing plants, biometric methods, spectrophotometry, light microscopy, HPLC, field methods, instrumental analysis of flax fiber quality.

**The results and their novelty:** the existence of narrow ranges of BS activity, in which they are able to increase or reduce the herbicidal effect of glyphosate on plants, depending on their species, was established. It was noted that the ranges of activity, appearing on the background of chemical stress, practically coincide in cultures and varieties for each of the brassinosteroids.

A decrease in the accumulation of shikimates in fiber flax seedlings and an increase in their accumulation in spring barley, when EBL is added to a mixture with glyphosate, indicates that the action of both agents is carried out by influencing the activity of a key enzyme (EPSP synthase) of shikimate pathway of biosynthesis of aromatic compounds.

The assumption is substantiated that the peculiarities of the regulation of biochemical processes in the cell may be related to the fact that brassinosteroids play the role of structural components of the cell membrane and affect the dynamics of its states.

**Recommendation for use:** the data obtained can be used in biotesting the activity of natural and synthetic plant steroids; the use of the brassinosteroid-pesticidal composition GPh +  $\alpha$ -NAA + EBL (6 g/ha + 100 g/ha + 30 mg/ha) on fiber flax plants can be recommended as a technique to improve the quality of flax fiber and in seed production.

**The field of application:** physiology and biochemistry of plants, chemistry of steroids, industrial flax growing.

