



Людмила Кабашникова,
завлабораторией прикладной
биофизики и биохимии Института
биофизики и клеточной
инженерии НАН Беларуси,
член-корреспондент

БИОГЕННЫЕ ИММУНОСТИМУЛЯТОРЫ — НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Обеспечение человечества продуктами питания — мировая проблема XXI века. В условиях роста населения, сопровождающегося уменьшением возделываемых площадей, истощаемостью ресурсов Земли, глобальными изменениями климата, она может быть решена только посредством прогрессирующей интенсификации растениеводства, которая базируется на трех главных составляющих: высокоурожайных сортах, значительном фоне минерального питания, защите растений [1]. Основа этой триады, безусловно, — генетический потенциал возделываемых культур, реализуемый посредством создания новых, более урожайных сортов. Однако их высокая продуктивность не всегда сочетается с другими полезными свойствами, в частности с устойчивостью к биотическим (болезням, вредителям) и абиотическим (низким и высоким температурам, засухе и др.) факторам.

Биотические стрессы, такие как патогены, вредители и конкуренция, — основные ограничивающие факторы сельскохозяйственного производства. Среди них фитопатогены и вредители — главные причины потерь урожая 5 наиболее распространенных сельскохозяйственных культур во всем мире (пшеница — 10,1–28,1%; рис — 24,6–40,9%; кукуруза — 19,5–41,1%; картофель — 8,1–21,0% и соя — 11,0–32,4%) [2].

В современном сельском хозяйстве до сих пор использовались две основные страте-

гии борьбы с болезнетворными микроорганизмами: селекция сортов на устойчивость и применение химических пестицидов. Однако селекционное направление требует времени, и поскольку многие патогены быстро адаптируются, многочисленные примеры показали, что такого рода устойчивость быстро преодолевается, если не является комбинированной. Подобным же образом применение пестицидов, препятствующих росту возбудителей болезней, вызывает проблемы, связанные с увеличением резистентности патогенов.

Третий способ заключается в том, чтобы повысить собственный врожденный иммунитет растений с помощью индукторов устойчивости (*plant resistance inducers, PRIs*), что имеет целый ряд привлекательных аспектов [3]. Поскольку PRIs действуют косвенно на патоген через врожденный иммунитет, они не токсичны для живых организмов, как в случае с пестицидами. Кроме того, многие PRIs обладают широким спектром действия, что в свою очередь уменьшает вероятность развития устойчивости патогенов в противовес их резистентности к пестицидам. Кроме того, PRIs могут дополнять существующие методы обработки последними, тем самым способствуя снижению их количества, необходимого для эффективного контроля заболеваний.

Таким образом, расширение сферы применения PRIs может сформировать будущую важную часть устойчивого развития сельскохозяйственного производства и обеспечить снижение химической нагрузки на агроэкосистемы.

Современные стратегии повышения защитного потенциала растений

Выживаемость растительного организма, обусловленная защитой от патогенов и вредителей, характеризует его внутренние

резервы. Возможности любого вредного агента, вызывающего заболевание или иные повреждения, также зависят от совместимости с растением-хозяином, его рецепторов и мест локализации токсинов, необходимых питательных веществ, факторов роста и распознавания [4].

В широком смысле конститутивная, или непрерывная, защита включает в себя множество заранее сформированных барьеров, таких как клеточные стенки, восковые эпидермальные кутикулы и кора, которые охраняют растение от инвазии, а также придают силу и жесткость всему организму. Индуцируемая защита подразумевает производство токсичных химических веществ, деградацию ферментов патогенов и программируемую гибель клеток. Обнаружение возбудителей является стимулом для запуска синтеза токсичных соединений или белков, связанных с защитой, из-за более высоких затрат энергии и потребности в органических веществах.

Растения борются с патогенами и травоядными животными двумя основными способами (рис. 1):

- *благодаря структурным характеристикам, действующим как физические барьеры;*

- *с помощью биохимических реакций в клетках и тканях, токсичных для возбудителей или создающих условия, подавляющие проникновение и развитие их в растении.*

Экзогенное применение регуляторов роста, обладающих иммуностимулирующими свойствами, – современная альтернатива повышения защитных механизмов растений в сравнении с использованием химических пестицидов.

Преимущества новой агробиотехнологии:

- *укрепление природных защитных механизмов;*
- *сокращение поллютантов:* остатки химикатов могут присутствовать в товарной продукции, что существенно минимизируется, когда происходит усиление собственных защитных механизмов растений;
- *устойчивость к пестицидам и фунгицидам:* из-за многократного использования одних и тех же химических фунгицидов и пестицидов у возбудителя/травоядного животного развивается устойчивость к этим веществам. Тогда контроль над заболеванием будет ослаблен, но загрязнение увеличится, и, следовательно, усиление иммунитета растений может быть лучшей альтернативой для их защиты;

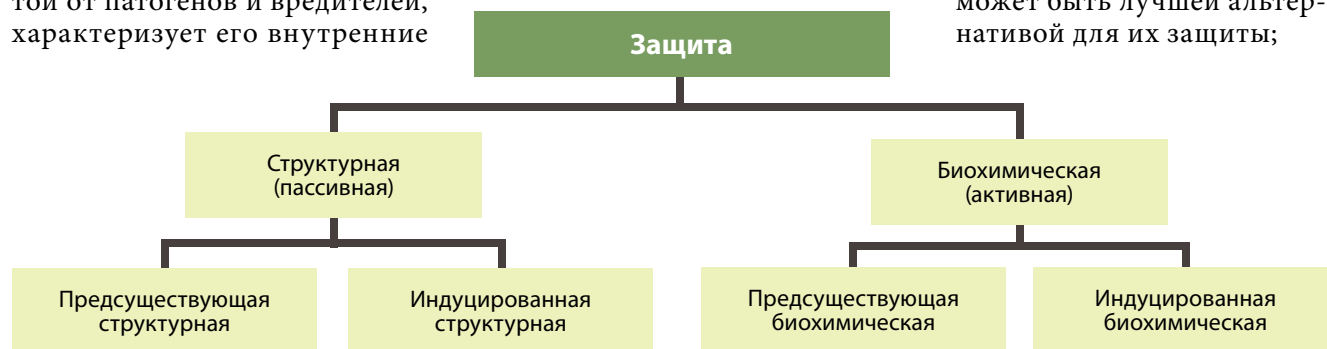


Рис. 1. Классификация механизмов защиты растений (адаптировано по [4])

■ **экономическая эффективность:** повышение собственной устойчивости культур требует затрат до тех пор, пока не будет достигнута максимальная защита от неблагоприятных факторов внешней среды, включая фитопатогены, что является эффективной альтернативой огромным инвестициям, вкладываемым в производство и применение химических средств.

Использование инновационных стратегий для усиления защитных механизмов растений открывает многообещающие возможности для развития устойчивого сельского хозяйства. Объединив научные знания с практическими аспектами, можно возделывать устойчивые культуры, которые будут процветать в разнообразных экологических условиях, в конечном итоге обеспечивая продовольственную безопасность и охрану окружающей среды для настоящего и будущих поколений.

Природные индукторы устойчивости

К числу природных индукторов базовой устойчивости относится группа молекул растительного происхождения, которые культуры узнают как сигналы, свидетельствующие о присутствии патогенов, в том числе фрагменты пектина, кутина, целлюлозы, ксилозы и других собственных защитных полимеров, высвобождаемых при действии гидролитических ферментов (целлюлаз, кутиназ, пектиназ)

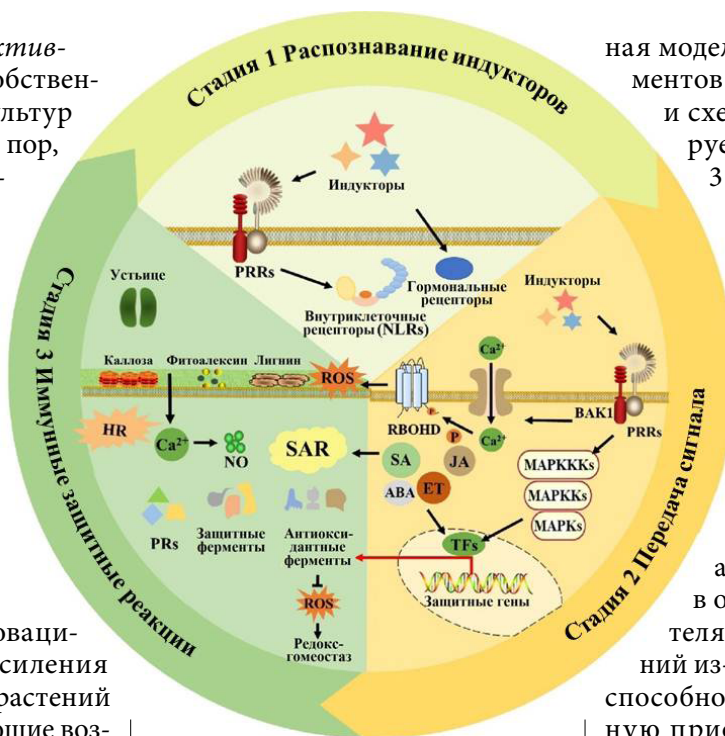


Рис. 2. Схема активации иммунитета растений (адаптировано по [5])

патогенов или самого растения. Его рецепторы способны идентифицировать собственные (эндогенные) молекулы, образующиеся в результате активности ферментов микроорганизмов. Ассоциированные с повреждением молекулы появляются прежде всего в апопласте растительных тканей и служат, как и неспецифические элиситоры микроорганизмов, индукторами базовой устойчивости. Образование таких эндогенных сигнальных молекул позволяет разрушенным или поврежденным клеткам передавать сигнал о своем состоянии другим клеткам и тканям (или даже системно – всем органам растения).

Индукторы иммунитета обладают незначительной прямой бактерицидной, противогрибковой или противовирусной активностью, однако они могут стимулировать иммунную систему растений. Наиболее разработан-

ная модель действия таких элементов представлена на рис. 2 и схематически иллюстрирует ключевые моменты 3 этапов (распознавание или обнаружение; передача сигнала или активация (модуляция); защитная реакция или эффективное сопротивление) [5].

Следует отметить, что в настоящее время природные индукторы устойчивости – предмет активных исследований в области борьбы с вредителями и болезнями растений из-за их универсальности, способности усиливать системную приобретенную устойчивость (systemic acquired resistance, SAR), общей низкой токсичности (табл. 1), что обеспечивает их лучшую переносимость сельскохозяйственными культурами и меньшее количество проблем со здоровьем человека, обычно связанных с традиционными стратегиями защиты [6].

Отечественные препараты на основе иммуностимуляторов

В Институте биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси изучены молекулярно-клеточные механизмы действия природных индукторов болезнеустойчивости растений – салициловой кислоты (СК), β -аминомасляной кислоты (β -АМК) и β -1,3-глюкана на растения ряда злаковых, овощных и технических культур при патологических процессах, вызванных возбудителями корневых гнилей [7].

Впервые установлены стабилизирующие механизмы действия

экзогенной СК и кратковременной гипертермии на структурно-функциональное состояние биомембран растительной клетки при инфицировании грибным патогеном *Bipolaris sorokiniana*, о чем свидетельствует снижение проницаемости клеточных мембран для свободных нуклеотидов и скорости выхода ионов калия из клеток, а также более раннее защелачивание апопластического пространства у зараженных экземпляров. Кратковременная гипертермия и экзогенная СК вызывают в инфицированных растениях ячменя повышение уровня активных форм кислорода (АФК), в том числе пероксида водорода, за счет активации НАДФН-оксидазной системы в клетках мезофилла, что вызывает развитие

защитных ответных реакций, а именно возрастание экспрессии генов защитных белков – хитиназы (*cht2*) и β -1,3-глюканазы (*glu*), активацию ключевого фермента синтеза фенолов – фенилаланинаммоний лиазы и синтеза водорастворимых фенольных соединений; в инфицированных листьях накапливаются фотосинтетические пигменты, происходит стабилизация функциональной активности ФС II и восстанавливается стехиометрия пигмент-белковых комплексов ФС I и ФС II, что указывает на протекание адаптационных процессов на уровне фотосинтетических мембран. Научно обосновано применение салицилатов при возделывании ярового ячменя и разработанная высокоэффективная техно-

логия повышения устойчивости культуры к гельминтоспориозу с использованием препарата «Иммунакт-СК», обеспечивающая увеличение урожайности на 4 ц/га при минимизации экологических рисков [7].

Впервые установлены особенности протекания защитных реакций в растениях ярового ячменя, индуцированных β -АМК, при инфицировании грибным патогеном *Bipolaris sorokiniana*. Обнаружен защитный эффект β -АМК на процесс перекисного окисления липидов в мембранах культуры после заражения грибным патогеном, который сопровождается увеличением общего содержания АФК и пероксида водорода на фоне стабильной активности антиоксидантных

Индуктор	Растение	Вредитель	SA*	JA*	ET*	SAR	Защитные эффекты	Укрепление клеточной стенки	Окислительный цбаланс
Томат	Томат	<i>Botrytis cinerea</i>	+	+	+	H/O	+	+	+
	Арабидопсис	<i>Botrytis cinerea</i>	H/O	H/O	H/O	H/O	+	+	H/O
	Томат	<i>P.syringae</i>	H/O	+	H/O	H/O	+	+	H/O
Тиамин	Рис, арабидопсис	Грибные, бактериальные, вирусные инфекции	+	–	–	+	–	+	+
	Арабидопсис	<i>P. syringae</i>	–	–	–	+	+	+	+
	Томат	<i>Botrytis cinerea</i>	H/O	+	–	+	H/O	H/O	–
РАВА (парааминобензойная кислота)	Перец	CMV, <i>Xanthomonas</i>	+	–	H/O	+	+	H/O	H/O
Менадион (натрия бисульфит, MSB K3)	Арабидопсис	<i>P. syringae</i>	H/O	H/O	H/O	–	+	H/O	+
VOGs (летучие органические соединения)	Кукуруза, бобы, Арабидопсис	Насекомые	H/O	+	+	H/O	+	+	+
Ogs (олигогалактурониды)	Арабидопсис	<i>Botrytis cinerea</i>	–	–	–	–	+	H/O	+
Хитозан	Соя, томат, кукуруза	Грибные, бактериальные, вирусные инфекции	H/O	+	H/O	H/O	+	+	+
		<i>Colletotrichum sp</i>	H/O	+	H/O	H/O	+	+	+
		<i>Xanthomonas</i>	H/O	+	H/O	H/O	+	+	+
	Брокколи	<i>P. fluorescens</i>	H/O	+	H/O	H/O	+	+	+

Таблица 1. Природные индукторы и их эффекты на защитные механизмы растений (адаптировано по [6])

Примечание: (+) – активрует; (–) – не активрует; H/O – не определено; SA* (салициловая кислота), JA* (жасмоновая кислота), ET* (этилен) образуются в зависимости от сигнального пути (+) или не образуются (–)

ферментов (НАДФН-оксидазы и пероксидазы). Обнаружены сравнительно быстрые и обратимые изменения pH в листовых тканях растения, которые проявляются в защелачивании апопласта и закислении цитоплазмы в первые 30 мин. после введения β -АМК. Показано ее положительное влияние на биосинтез фотосинтетических пигментов в молодых листьях на синтетической ветви метаболизма и отсутствие такового в стареющих. Научно обосновано использование пленкообразующего состава, содержащего водорастворимый полимер (ВРП-3) и β -АМК в посевах ярового ячменя для повышения устойчивости и зерновой продуктивности культуры [7].

Установлено, что β -1,3-глюкан проявляет многостороннее положительное действие на растения томата и огурца, культивируемые в условиях малообъемной гидропоники в закрытом грунте, а также льна-долгунца и льна масличного; оказывает стимулирующий эффект на биосинтез фотосинтетических пигментов и фотохимическую активность ФС II; индуцирует накопление фенольных соединений в тканях культур, что имеет существенное значение для укрепления клеточных стенок, способствует генерации АФК, выполняющих сигнальную функцию и включающих естественные внутренние защитные механизмы [7].

В производственных условиях экспериментально доказано праймирующее действие препаратов «Иммунакт», содержащих природные иммуномодулирующие агенты (СК, β -АМК, β -1,3-глюкан), при выращивании ярового ячменя, превосходящее по эффективности стандартный фунгицид «Адексар». По томату и огурцу в условиях малообъемной гидро-

поники в защищенном грунте отмечена действенность регулятора роста «Иммунакт-ГК», ВСК против болезней и положительное влияние на урожайность овощей, превышающая стандартный «Экосил», ВЭ. Доказана высокая эффективность препарата «Иммунакт-ГК», ВСК в посевах льна-долгунца по сравнению с эталоном «Экосил», ВЭ, обеспечивающая повышение урожайности льносемян и льноволокна, а также качества льнопродукции. Аналогичный эффект прослеживается в посевах льна масличного. В целом результаты проведенных производственных испытаний показали высокую эффективность препаратов «Иммунакт» для защиты зерновых, овощных и технических культур, превышающую уровень стандартной технологии возделывания и обеспечивающую получение стабильных урожаев высокого качества.

В 2023 г. получил государственную регистрацию и рекомендован для применения на яровой и озимой пшенице комбинированный двухкомпонентный регулятор роста «Иммунакт-БИО», ВСК, созданный совместно с Институтом защиты растений. Препарат содержит β -1,3-глюкан и прилипатель ВРП-3, а также культуральную жидкость *Trichoderma* sp. D-11, стимулирующие рост растений и способствующие устойчивости к мучнистой росе. Внедрение «Иммунакт-БИО» в производство в 2024 г. обеспечило прибавку урожайности кондиционных семян яровой пшеницы (сорт Сударыня, с/э) на 6,4 ц/га на площади 50 га.

Выпуск регуляторов роста «Иммунакт-ГК», ВСК и «Иммунакт-БИО», ВСК в рамках лицензионного договора осуществляет ЧПУП «ЧервеньАгро» (Витебская обл., Докшицкий р-н, д. Парафьяново).

Перспективы создания новых средств защиты растений

Ввиду прикрепленного образа жизни и отсутствия специализированной иммунной системы растения, в отличие от животных, не могут избежать стресса и, следовательно, приобрели сложные стратегии для выживания в условиях биотических и абиотических повреждений [8]. Согласно биохимической теории коэволюционной «гонки вооружений», механизмы устойчивости к травоядным животным, насекомым-вредителям и фитопатогенам развились в результате появления вторичных метаболитов в ответ на давление со стороны этих организмов. Вместо сложной иммунной системы со специализированными антителами растения используют для защиты от вредных воздействий вторичные метаболиты, которых зарегистрировано на сегодня более 2 млн 140 тыс. (алкалоиды, фенольные соединения и терпеноиды). Их спектр классифицируется по биосинтетическому происхождению, функциям и структуре. Существует 5 основных категорий вторичных метаболитов: алкалоиды, производные жирных кислот и поликетиды, кофакторы ферментов, нерибосомальные полипептиды, терпеноиды и стероиды [8].

Низкомолекулярные антимикробные соединения, известные как фитоалексины, индуцируются биотическим стрессом или инфекцией как компоненты активных защитных механизмов у растений. Краеугольным камнем устойчивости к биотическому стрессу являются фитогормоны – растительные антибиотики, присутствующие



Рис. 3. Роль вторичных метаболитов растений в защите от биотического стресса (адаптировано по [8])

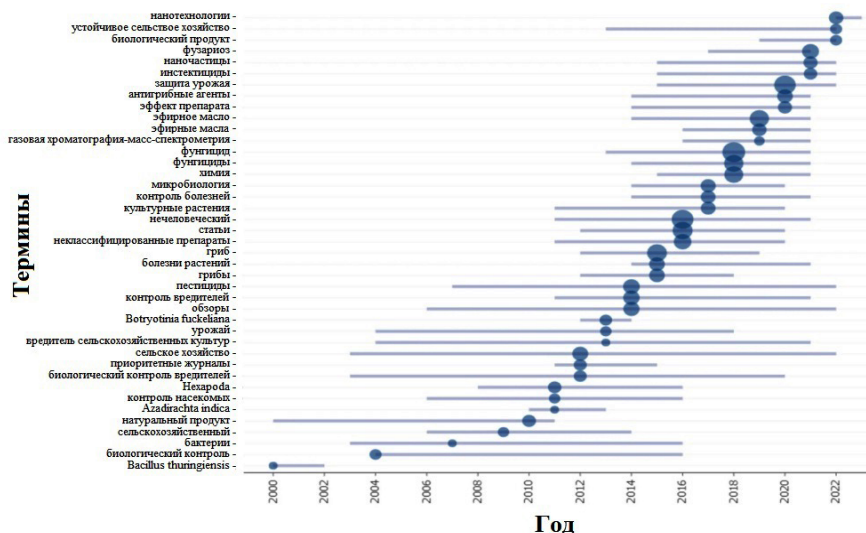
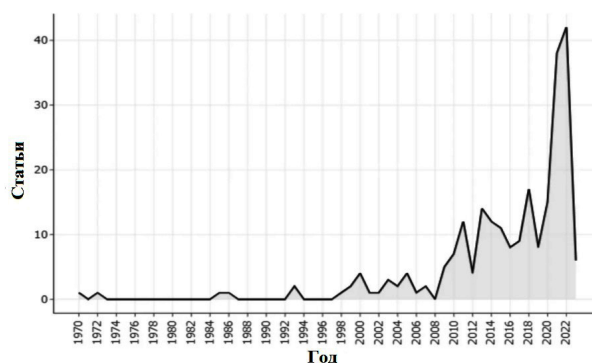


Рис. 4. Тенденция увеличения тематики исследований, посвященных применению растений для биологического контроля [адаптировано по 9]

Рис. 5. Ежегодные научные публикации (1970–2023 гг.) в области исследований, посвященных защите растений на основе вторичных метаболитов [адаптировано по 9].



в растительных тканях до заражения. Сапонины считаются фитоантиципинами у многих культур. На рис. 3 проиллюстрирована ключевая роль вторичных метаболитов в процессе защиты от биотического стресса.

Наиболее прогрессивная стратегия создания новых экологически безопасных средств защиты растений – использование растительных экстрактов, содержащих вторичные метаболиты (рис. 4, 5). По данным литературы уже определен 91 вид растений из 28 семейств с сильным потенциалом в качестве агентов биоконтроля. Семействами с наибольшим представительством являются *Lamiaceae* (яснотковые, 16 растений, 17,6%), *Solanaceae* (пасленовые, 11 растений, 12,1%) и *Ariaceae* (зонтичные, 7 и 7,7% соответственно). Листья (31%), надземные части (23%), семена (9%), цветы (4%) и луковицы (4%) наиболее часто применяют в качестве источников растительных препаратов для борьбы с патогенами сельскохозяйственных культур [9].

Наиболее активно это направление исследований развивается в таких странах, как Индия, Китай, Италия, Великобритания, США и Южная Африка, в которых выполнено большинство научных работ по использованию вторичных метаболитов в качестве средств защиты растений. Причем перечисленные страны, а также Мексика и Индия, лидируют по числу научных публикаций [9].

На рынке Беларуси присутствуют немногочисленные препараты, созданные на основе антимикробных метаболитов, которые в основном импортируются из России: «Росток», содержащий экстракты хвои сосны и ели, гуминовые кислоты торфа; «Новосил» и «Силк» с тритерпеновыми

кислотами из хвои пихты сибирской; «Альфастим», содержащий тритерпеновые кислоты; «НВ-101» (Япония, экспортер Россия), имеющий в составе вытяжки кипариса, гималайского кедра, сосны и подорожника; «Циркон» (Россия), изготовленный из эхинаеи пурпурной; «Агропон С» с комплексом биологически активных веществ и грибов эпифитов из женьшеня и облепихи (Украина).

В нашей стране на основе растительного сырья производится только несколько препаратов, обладающих иммуностимулирующим действием: «Экосил», ВЭ, «Экосил Микс», ВЭ, «Экосил Плюс», ВЭ (ЧПУП «ЧервеньАгро»), содержащие тритерпеновые кислоты из хвои пихты сибирской; «Экостим», ВК с тритерпеновыми

кислотами и L-аминокислотами (ООО «ШАУЭР ГРУПП»); «Мальтамин», Ж на основе органических веществ из ростков солода (ЗАО «Белнефлесорб»).

Разработка научных основ изготовления растительных экстрактов, обладающих антимикробными свойствами, – актуальная задача современной агробиотехнологии, решение которой позволит получить эффективные и экологически безопасные средства защиты растений нового поколения. **И**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Санин С. С. Интенсификация производства зерна пшеницы, фитосанитария и защита растений в центральном районе России / С. С. Санин [и др.] // Агрохимия. 2020. №10. С. 36–44.
2. The global burden of pathogens and pests on major food crops / S. Savary [et al.] // Nature Ecology and Evolution. 2019. Vol. 3, №3. P. 430–439.
3. Plant Resistance Inducers against Pathogens in Solanaceae Species – From Molecular Mechanisms to Field Application / E. Alexandersson [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2016. Vol. 17, №10. P. 1–25.
4. Soundarya H. L. Plant Armor: Strengthening Natural Defense for Biotic Stresses / H. L. Soundarya, Akshata, Tejashwini // Just Agriculture. 2024. Vol. 4. №8. P. 253–259.
5. Join the green team: Inducers of plant immunity in the plant disease sustainable control toolbox / F. Zhu [et al.] // Journal of Advanced Research. 2024. Vol. 57, №2. P. 15–42.
6. Priming of plant resistance by natural compounds. Hexanoic acid as a model / P. Aranega-Bou [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2014. Vol. 5. P. 1–12.
7. Природные индукторы устойчивости растений к фитопатогенам: научные и практические аспекты применения / Л. Ф. Кабашникова [и др.] // Национальная академия наук Беларуси, Институт биофизики и клеточной инженерии. – Минск, 2021. – 58 с.
8. Plant Secondary Metabolites: The Weapons for Biotic Stress Management / J. M. Al-Khayri [et al.] // Metabolites. 2023. Vol. 13, №6. P. 1–37.
9. Plants as an alternative to the use of chemicals for crop protection against biotic threats: trends and future perspectives / A. O. Aremu [et al.] // European Journal of Plant Pathology. 2024. Vol. 170. P. 711–766.

Экологические, экономические и технологические преимущества микробных биотехнологий обуславливают все более широкое их применение в аграрной отрасли. Они становятся приоритетными в связи с такими глобальными процессами, как рост населения, изменение климата, истощение природных ресурсов. Общемировые тенденции свидетельствуют о значительном увеличении инвестиций в исследования и внедрение методов, позволяющих производить биопрепараты и добавки для повышения плодородия почв и продуктивности животных, борьбы с вредителями и болезнями растений и животных.

Микробные биотехнологии в сельскохозяйственном производстве



Александр Шепшелев, директор Института микробиологии НАН Беларуси, кандидат технических наук, доцент



Елена Болотник, заместитель директора по научной и инновационной работе, кандидат биологических наук



Зинаида Алещенкова, главный научный сотрудник, доктор биологических наук, профессор