

Жанна Калацкая,
заместитель директора по научной
и инновационной работе Института
экспериментальной ботаники
НАН Беларуси, кандидат
биологических наук

Нинель Еловская,
научный сотрудник Института
экспериментальной ботаники
НАН Беларуси

Марина Мандрик-Литвинкович,
заведующий отраслевой
лабораторией ГНПО «Химический
синтез и биотехнологии»,
кандидат биологических наук

Ксения Гилевская,
ведущий научный сотрудник
Института химии новых материалов
НАН Беларуси, кандидат
химических наук

Игорь Овчинников,
научный сотрудник Института
экспериментальной ботаники
НАН Беларуси, аспирант

Екатерина Рыбинская,
научный сотрудник Института
экспериментальной ботаники
НАН Беларуси, аспирант

Инновации в агроэкологии: как Беларусь адаптируется к вызовам современности

Одно из ключевых направлений Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2035 г. и проекта документа до 2040 г. – экологизация аграрной отрасли, внедрение в практику методов органического и почвосберегающего сельского хозяйства. Планируется продолжить работы, нацеленные на сохранение и повышение плодородия земель путем внесения минеральных и органических удобрений, нанопрепаратов, использования экологически безопасных средств защиты растений.

Незаменимым инструментом повышения урожайности сельскохозяйственных культур в условиях высоких техногенных нагрузок становится использование микробных препаратов на основе бактерий, стимулирующих рост растений (Plant Growth Promoting Bacteria, PGPB), в том числе представителей рода *Bacillus*. Согласно многочисленным исследованиям, бактерии рода *Bacillus Cohn.* – наиболее изученная и перспективная группа для биологического контроля популяций фитопатогенов благодаря таким механизмам действия, как конкуренция за питательные вещества и пространство, синтез антибиотиков, гидролитических ферментов, противовирусных метаболитов, сидерофоров и/или индукция системной устойчивости растений. Кроме того, PGPB, относящиеся к роду *Bacillus*, способны повышать доступность элементов питания для расте-

ний и синтезировать ряд ростстимулирующих гормонов. Актуальным является поиск новых препаратов для сохранности биологических свойств бактериальных препаратов.

Значительное число научных отечественных и зарубежных публикаций и патентов свидетельствует о большом интересе и практической значимости изысканий, направленных на совершенствование товарных форм биопрепаратов для повышения приживаемости интродуцентов в биоценозах, их устойчивости к физико-химическим воздействиям окружающей среды, стабильности конечного продукта. Для этого могут быть задействованы различные методы иммобилизации микроорганизмов-антагонистов, предусматривающие адсорбцию клеток в гелях или на твердых носителях и др.

Доказана и широко изучается роль индукторов устойчивости биогенной и абиогенной природы для повышения общей неспецифической устойчивости

растений (иммунного статуса) к неблагоприятным факторам путем стимуляции природных защитных механизмов. Для этого применяются фрагменты молекул природных биополимеров, таких как полисахариды, к достоинствам которых относится возобновляемая и доступная сырьевая база и ряд таких уникальных и ценных свойств, как биосовместимость, нетоксичность и широкий спектр физиолого-биохимической активности. Широко используемые полисахариды – это пектины и хитозаны. В последние годы доказан потенциал практического применения не только для олигомерных и полимерных форм этих полисахаридов, но и для их структурных аналогов и нанокомпози́тов с наночастицами металлов и оксидов металлов.

На основе хитозана и его производных созданы коммерческие препараты для защиты растений от грибных, бактериальных и вирусных болезней: Chito Plant, Biochit, Stemicol (EC), Elexa, PDB – Plant Defense Booster, YEA – Yield Enhancing Agent (США). Ведущий научный центр по разработке препаратов на основе хитозана в Российской Федерации – Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений (Санкт-Петербург) – создал средства Хитозар, Нарцисс, Экогель и др.

Следует учитывать, что существуют лимитирующие факторы широкого практического применения хитозана, которые связаны с его физико-химическими свойствами: низкой растворимостью в воде, невысокой стабильностью в почве и недостаточной адгезионной активностью. К тому же биологическая активность данного полисахарида во многом зависит от его молекулярной массы, степени полимеризации и деацетилирования, что усложняет подбор эффективной дозировки и делает производство и применение препаратов экономически нецелесообразным.

При этом наличие в его биополимерной цепи функциональных групп позволяет получать различные солевые формы (гидрохлориды, лактаты и др.) и синтезировать функциональные производные: карбоксиметилхитозан, гидроксипропилхитозан. Компании Agrilaete (Италия) и ChiPro GmbH (Германия) выпустили препараты для защиты и стимуляции роста растений на основе гидрохлорида хитозана – Chitosano и ChiProPlant.

В последнее десятилетие в Институте химии новых материалов НАН Беларуси активно разрабатываются функциональные материалы медицинского и сельскохозяйственного назначения на основе полисахаридов и их производных, в том числе хитозана модифицированного фрагментами феноль-

ных кислот. Так, в ИХНМ разработаны методики синтеза конъюгатов хитозана с оксикоричными кислотами в соответствии с принципами «зеленой химии» и получения нанокомпози́тов пектин-серебро и хитозан-серебро в соответствии с принципами «зеленой» химии.

Введение новых функциональных групп и заместителей в хитозан позволяет получать производные с повышенной растворимостью и улучшенной антиоксидантной активностью. Исследования биологической активности производных хитозана с оксисбензойными и оксикоричными кислотами обусловлены участием последних в защите культур от биотических стрессов. Растения отвечают на атаку патогенов аккумуляцией таких фитоалексинов, как гидроксикумарины и конъюгаты гидроксициннамата. Синтез, высвобождение и накопление фенольных веществ (в частности, салициловой кислоты) – центральные звенья многих защитных стратегий от патогенов. Было показано, что конъюгация хитозана и кофейной кислоты позволяет получать материалы с улучшенными свойствами: антиоксидантными, антимикробными, рост-стимулирующими и др.

Модифицированные соединения хитозана, являясь биополимерами и биологически активными веществами, могут расширять защитный спектр биопрепаратов на основе бактерий рода *Bacillus*, в том числе выступать в качестве носителей микробиологических средств.

Благодаря совместным исследованиям ученых Института химии новых материалов и Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси доказана перспективность модифицированных производных хитозана при выращивании растений; дана оценка ростовой активности наночастиц хитозана с молекулярными массами 20 кДа и 800 кДа и феруловой кислотой на пшенице и редисе; выявлен положительный эффект обработки семян конъюгатами на основе хитозана и оксикоричных кислот при выращивании проростков огурца, ячменя и редиса. Соединения способны оказывать стимулирующее воздействие на микроклональные растения картофеля в культуре *in vitro*, повышая их устойчивость к осмотическому стрессу. Выявлено физиологически активное влияние синтезированных нано- и субмикронных гидрогелевых частиц пектината кальция с транс-коричной кислотой на всхожесть семян и накопление фотосинтетических пигментов в листьях проростков кукурузы.

В совместных международных исследованиях Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси и Института биохимии и генетики

УФИЦ РАН (Российская Федерация) установлено, что обработка *Bacillus subtilis* и конъюгатов хитозана с гидроксикоричными кислотами стимулировала защитные реакции картофеля против возбудителя фитофтороза и Y-вируса.

Следует отметить, что в целом потенциал многих биологически активных веществ, в частности синтетических фитогормонов или низкомолекулярных фенольных соединений в комплексе с микробиологическими препаратами для создания, например, новых регуляторов роста или биопестицидов, практически не изучен; выпускается незначительное количество таких средств, что, вероятно, объясняется их низкой растворимостью в водных растворах и другими физико-химическими свойствами.

Сотрудниками Института экспериментальной ботаники и ГНПО «Химический синтез и биотехнологии» НАН Беларуси разработан регулятор роста растений «МАКРОФИТУМ, ВС» на основе бактерий *Bacillus subtilis* и комплекса синтетических фитогормонов, который обеспечивает активный рост цветочных культур, существенно повышает их декоративность, снижает заболеваемость за счет оптимизации усвоения элементов питания и улучшения свойств субстрата, а также, по сравнению с зарубежными аналогами, имеет более низкую стоимость. Отечественная разработка частично заменяет импортные препараты, имеет низкую токсичность, может применяться в водоохранной зоне.

К перспективным, экологически безопасным технологическим приемам, обеспечивающим повышение продуктивности культур, относят их обработку регуляторами роста (биостимуляторами). При низких нормах расхода они оказывают существенное влияние на ростовые, физиологические и формообразовательные процессы в культурах. Согласно прогнозам, рынок биостимуляторов достигнет 4,9 млрд долл. в 2025 г. при среднегодовом темпе роста 11,2%. Такая тенденция обусловлена в первую очередь потребностью в сохранении продуктивности сельхозкультур, снижающейся из-за неблагоприятных факторов, обусловленных изменениями климатических условий и интенсивными методами сельхозпроизводства. Использование наноматериалов создает предпосылки для ведения устойчивого сельского хозяйства. Значительного прогресса в данной области достиг Китай. Количество опубликованных учеными этой страны статей, зарегистрированных индексом цитирования (SCI), касающихся нанотехнологий, выше, чем у американских исследователей.

Преобладающими на рынке нанопродуктами для аграрного сектора являются удобрения. У США – лидирующие позиции по патентам и публикациям, связанным с технологиями их выпуска. Все изготовленные в Соединенных Штатах и упоминаемые в литературе нанопрепараты для аграрной отрасли – жидкие удобрения, полностью растворимые в воде.

Российский НИИ удобрений и инсектофунгицидов им. Я. В. Самойлова также ведет работы по созданию наноудобрений с помощью методов измельчения крупномолекулярных образований питательных и биологически активных веществ. В растворимые в воде составы входят гуматы, фульво- и аминокислоты, витамины, натуральные фитогормоны, микро-, мезо- и макроэлементы. Доказано, что фунгицидная активность препарата Зерокс, содержащего коллоидное серебро, в отношении *P. infestans* превышает активность Манкоцеба и находится на уровне таких широко применяемых на практике фунгицидов, как флуазинам и хлороталонил.

В Беларуси активно развиваются фундаментальные и прикладные исследования, нацеленные на разработку методов получения и изучения биологического воздействия наноматериалов на живые организмы. Для сельского хозяйства производится регулятор роста растений и 5 марок микроудобрений с наноразмерными микроэлементами в составе. Институтом физико-органической химии НАН Беларуси совместно с Институтом экспериментальной ботаники НАН Беларуси разработано и выпускается микроудобрение Наноплант, содержащее наночастицы микроэлементов.

Наиболее выраженный биоцидный эффект характерен для наночастиц серебра, особенно в отношении таких патогенов, как *Phytophthora parasitica*, *Fusarium* spp. и *Meloidogyne* spp. О действии наночастиц на растения в литературе приводятся противоречивые сведения: одни авторы показывают их негативное влияние, другие выявили стимулирующий эффект, третьи зафиксировали отсутствие какого-либо результата, некоторые утверждают о разнонаправленной реакции представителей различных видов.

Именно поэтому синтез наночастиц серебра (Ag) желательно осуществлять в соответствии с принципами «зеленой» химии, то есть без токсичных восстановителей и органических растворителей, чтобы избежать дополнительных стадий очистки готового продукта от них и определения остаточных количеств. Известны способы получения наночастиц серебра под действием экстрактов растений, грибов, дрожжей и водорослей. Перспективный

способ синтеза – химическое восстановление катионов Ag^+ полисахаридами. Использование их восстановительного и стабилизирующего потенциала позволяет получать коллоиды в водных средах без токсичных восстановителей и растворителей, а также без дополнительного введения стабилизатора в реакционную смесь. Следует отметить, что синтезируемые таким способом наноконкомпозиты полисахарид- Ag биосовместимы и могут обладать свойствами, присущими каждому из компонентов, а также вероятно реализация синергетического действия.

Совместные исследования Института экспериментальной ботаники и Института химии новых материалов НАН Беларуси демонстрируют перспективность разработки препаратов на основе наноконкомпозитов полисахарид- Ag . Установлено, что для микрораспространенных растений картофеля токсичность наночастиц серебра зависит от их структуры, включающей неорганическое ядро Ag^0 , стабилизированное полимерной оболочкой полисахарида хитозана (core-shell-структура), и массового содержания хитозана, формирующего плотную оболочку, замедляющую процесс образования ионов серебра Ag^+ . Показано, что применение наноконкомпозитов «пектин-серебро» приводит к снижению интенсивности окислительных процессов, вызванных некротрофными грибными патогенами, усилению лигнификации растительной клетки на начальном этапе развития болезни, что способствует замедлению некрозообразования и сохранению жизнеспособности листьев ячменя в модельном эксперименте.

На отдельных культурах доказана эффективность применения наноконкомпозитов полисахарид- Ag совместно с бактериями *Bacillus subtilis* против фитопатогенов.

Дополнительными агрохимическими ресурсами, способствующими восстановлению почв, снижению заболеваемости и сохранению продуктивности растений, могут быть комплексные удобрения и добавки на основе различных минеральных компонентов (природные минералы, руды), включающих полезные штаммы микроорганизмов, элементы питания и БАДы.

Улучшить плодородие можно путем использования медленно действующих средств, представляющих собой ионитные (ионообменные) цеолитные питательные субстраты, включающие биологические активаторы почвенных процессов.

Впервые теоретические основы и практические методы получения полноценных питательных ионообменных сред (субстратов) для выращивания рас-

тений разработаны под руководством академика НАН Беларуси В.С. Солдатова. Как показали длительные исследования, проведенные в том числе и в Институте экспериментальной ботаники, такие субстраты обладают оптимальным сочетанием агрофизических и питательных свойств, просты в эксплуатации, обеспечивают высокое качество растительного материала.

В настоящее время группой ученых под руководством академика В.С. Солдатова проводятся эксперименты по изучению влияния питательных субстратов на основе цеолитов, а также гранулометрического состава цеолитного субстрата Цион® и его содержания в различных грунтах на рост и развитие растений.

В Институте экспериментальной ботаники разработан и используется ионообменный субстрат Триона®, который проходит этапы модификации и оптимизации.

За рубежом изыскания шли в большей степени в направлении культивирования растений на обогащенных цеолитовых субстратах, в так называемой циопонной среде. Болгарские исследователи первыми изготовили такой субстрат из цеолита, торфа и вермикулита, который назвали зеоронис. С тех пор различные системы Циопоник для роста растений создавали ученые NASA для национального агентства аэронавтики и космоса США. Его специалисты представили искусственный субстрат, обеспечивающий растения необходимыми питательными веществами. Он содержал клиноптилолит (разновидность цеолита), насыщенный ионами аммония и калия и в дополнение к катионообменнику – другие твердофазные минералы, такие как доломит, кальцит и др., обуславливающие наличие необходимых буферных ионов, анионов и микроэлементов.

В наши дни цеолиты привлекают особое внимание в связи с их уникальными характеристиками и множеством преимуществ для сельскохозяйственной деятельности. Доказано, что составы значительно улучшают рост, урожайность и качество большинства культур и максимизируют эффективность использования ресурсов.

Тренд ежегодных публикаций о применении цеолита в сельском хозяйстве представлен на рисунке.

В ионитных субстратах элементы питания культур связаны с носителем и могут высвобождаться и усваиваться только в обмен на ионы-метаболиты, синтезируемые самим растением из углекислого газа и воды (ионы водорода, гидрокарбонат- и карбонат-ионы). Благодаря этому объект получает только то, что ему действительно необходимо.

Способность ионитных субстратов ограниченно поглощать и удерживать биогенные элементы питания (основа минеральных удобрений) с последующим их контролируемым выделением обеспечивает сохранение плодородия грунта в течение длительного периода времени.

В качестве ионообменного субстрата особо перспективен цеолит – природный минерал, включающий оксиды алюминия, железа, натрия, магния, марганца, кальция, титана, калия, кремния и обладающий сорбирующими, ионообменными, каталитическими и буферными свойствами. Благодаря высокой ионообменной способности (0,65 мг-экв/г по ионам аммония и калия) цеолиты поглощают и сохраняют элементы питания в зоне корней растений, вымывание азота уменьшается в 4–5 раз, усвоение удобрений улучшается на 20–40%.

Многообещающий биоактивный компонент питательного цеолитного субстрата – трепел – еще один природный минерал, добываемый в республике из месторождения «Стальное» Хотимского р-на Могилевской обл. Он относится к известковому типу с достаточно равномерным распределением кремневой (опал-кристобалитовой), глинистой и карбонатной составляющих и широким распространением цеолитов (до 25%), тонко рассеянных в матриксе, содержит макро- и микроэлементы, обладает сорбционными свойствами и зарекомендовал себя прекрасным мелиорантом. По количеству усваиваемого растениями кремния (от 10 до 30%) его можно отнести к природным кремнийсодержащим полиминеральным удобрениям.

В этой связи средства на основе природных минералов с включением и агрономически ценных микроорганизмов, и биологически активных соединений представляют особую значимость,

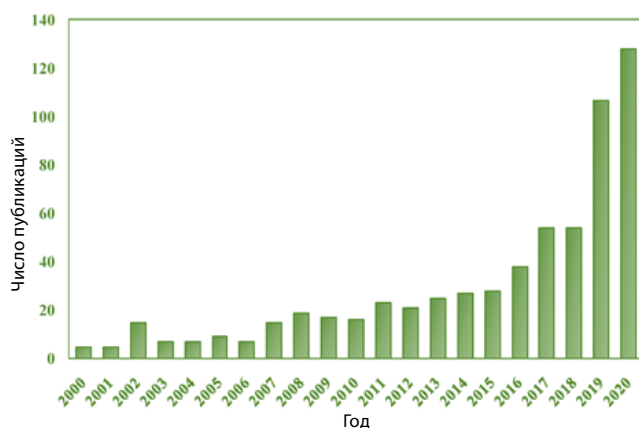


Рисунок. Тенденция ежегодных публикаций о применении цеолита в сельском хозяйстве в 2000–2020 гг.

поскольку их внесение позволяет улучшить структуру и физико-химические свойства почвы, нормализовать ее кислотность, активизировать деятельность полезных бактерий, ускорить формирование корневой системы. Кроме того, они характеризуются длительностью использования, поскольку связанные с ионообменниками элементы питания поглощаются растениями постепенно, в течение всего вегетационного периода.

Институтом экспериментальной ботаники совместно с ГНПО «Химический синтез и биотехнологии НАН Беларуси» и Центральным ботаническим садом разработаны бактериализованные гранулированные удобрения и добавки, которые сочетают в себе достоинства отдельно взятых органических и минеральных составляющих, усиливают и продлевают действие каждого из компонентов. Вследствие уникальных ионообменных и адсорбционных свойств трепела, наличия легко усваиваемого растениями кремния бактериализованные удобрения повышают эффективность использования макро- и микроэлементов из минеральных солей; активные вещества, вырабатываемые микроорганизмами, стимулируют физиологические процессы и укрепляют иммунную систему растений, ускоряют их рост и развитие. Благодаря повышенному содержанию кальция трепел способствует нормализации кислотности почв, активизирует деятельность полезных микроорганизмов, обеспечивает формирование хорошо развитой корневой системы, а также улучшает водный и воздушный режимы почвы, совершенствует структуру верхнего плодородного горизонта, проявляет себя как мелиорант.

Эти удобрения удобно транспортировать и хранить, равномерно вносить на больших площадях при помощи стандартной техники. Сохранению гранулы способствует торф высокой степени разложения. Кроме того, она является стабильным источником полезной микрофлоры в постоянно меняющихся в ризосфере условиях.

Таким образом, одной из наиболее эффективных стратегий сохранения и повышения плодородия почв следует считать разработку технологий комплексных экологически безопасных биопрепаратов и биоудобрений, включающих бактерии, стимулирующие рост растений, и модифицированные природные соединения (полисахариды или вторичные метаболиты растений), а также природные минералы, которые, в отличие от химических пестицидов, не загрязняют окружающую среду, не оказывают негативного влияния на экосистемы и здоровье человека, но при этом не менее эффективны. ■