

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ формирования устойчивых и продуктивных агроэкосистем

Термин «агроэкология» в научной литературе впервые появился в XX в. По мнению большинства ученых, он неотъемлемо связан с работами американского эколога Джорджа Э. Бухнаса, обозначившего новое научное направление, сформированное на стыке экологии и сельского хозяйства, изучающее взаимосвязи между аграрными системами и окружающей средой. Согласно современной формулировке, агроэкология представляет собой раздел экологии, нацеленный на создание технологий, методов и приемов, необходимых для получения качественной сельскохозяйственной продукции в условиях индустриального хозяйства, призванный оценивать антропогенные факторы, оказывающие техногенное воздействие на экосистему, включая применение химических и биологических удобрений и средств защиты, мелиорацию почв, заготовку кормов, выпас скота и пр.

Исходя из общего принципа функционирования биологических систем (в том числе и экосистем), основными критериями, определяющими их состояние, являются продуктивность, устойчивость, биологическое разнообразие и эффективность. Вследствие этого современные технологии и практики агроэкологии направлены на решение следующих задач:

- оптимизацию потоков веществ и энергии, активизацию работы наследственного аппарата продуцентов, обеспечение доступности питательных веществ;
- повышение стабильности биологических систем, совершенствование защитных механизмов, использование в этих целях сторонних факторов, развитие интегрированных систем защиты растений;
- сохранение и воспроизводство разнообразия на различных уровнях организации живых систем;
- совершенствование механизмов управления биологическими ресурсами, оптимизация функционирования биологических систем, включая создание комплексных.



Олег Баранов,
академик-секретарь
Отделения биологических наук
НАН Беларуси, член-корреспондент



Жанна Анисова,
ученый секретарь
Отделения биологических наук
НАН Беларуси

Один из практических примеров оптимизации потоков веществ и энергии – применение различных способов компостирования, позволяющих сократить количество регулярно вносимых питательных веществ для поддержания почвенного плодородия. Для интенсификации процессов минерализации органических остатков используют грибные или микробные штаммы-деструкторы, а также различные виды беспозвоночных-детритофагов, в том

числе вермикультуры. Также перспективны технологии аэробного компостирования, значительно (в 3–5 раз) сокращающие время получения компостов, увеличивающие в них содержание гуминовых кислот и доступных элементов питания, а также повышающие экологичность технологических процессов за счет снижения выбросов метана по сравнению с анаэробным разложением.

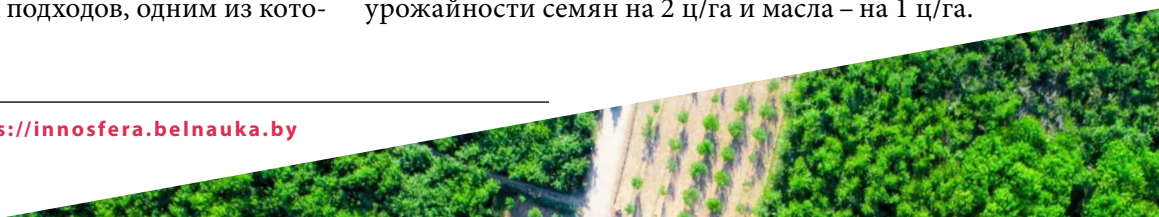
Альтернативная технология – технология биоферментации, она призвана улучшать плодородие почвы с помощью микробных препаратов. При этом, в отличие от прямого применения штаммов-деструкторов, почва насыщается необходимыми ферментами, ускоряющими минерализацию органических остатков. Данный подход позволяет задействовать дополнительные ресурсы сапротрофных и гетеротрофных организмов, обитающих в почве. Оценка эффективности внедрения данных технологий показала ускорение минерализации органических остатков в 2–3 раза, повышение доступности фосфора на 30–50%, улучшение структуры земель за счет образования стабильных гумусовых соединений. Дальнейшее развитие данного направления связано с разработкой адаптированных к конкретным агроландшафтам и климатическим условиям «интеллектуальных» ферментных систем. Они представляют собой биотехнологический инструмент для перехода к устойчивому сельскому хозяйству, сочетающему высокую продуктивность с экологической безопасностью, рациональное применение которого, по мнению многих ученых и практиков, позволит значительно снизить химическую нагрузку на агроэкосистемы при одновременном повышении урожайности и качества продукции.

Не менее важный аспект – максимальная реализация генетического потенциала продуцентов (растений), представленных в основном сельскохозяйственными культурами. Формирование в них необходимых признаков и свойств может быть достигнуто двумя путями: интенсивным – за счет структурных изменений генов (наследственная изменчивость) и экстенсивным – вследствие трансформации уровня их активности (экспрессии). Это может быть обусловлено прямым или косвенным воздействием внешних факторов среды, представлять собой следствие модификаций регуляторных генетических элементов, определяться доступностью генетической информации для ее реализации (транскрипции и трансляции) и вызвано увеличением числа копий генетического материала. Селекционный отбор растений по признаку продуктивности может выполняться с применением различных подходов, одним из кото-

рых является применение методов ДНК-маркирования, что дает возможность диагностировать хозяйственно ценные растения еще на ранних стадиях их развития, а также прогнозировать проявление требуемых признаков и свойств. Кроме того, современные молекулярно-генетические подходы дают возможность не просто проводить отбор селективируемых экземпляров, но и направленно создавать формы и сорта с заданными параметрами. Одно из популярных направлений – геномное редактирование – позволяет исправлять или «переписывать» генетическую информацию в нужном для селекционеров формате. Наиболее значимые результаты связаны с технологией редактирования CRISPR/Cas9, основанной на заимствовании природного генетического инструмента бактерий для борьбы с вирусами. Преимущества метода – точность и контролируемость вносимых изменений, более быстрое (2–3 года вместо 10–15 лет) создание новых сортов, наличие эмерджентности, что может приводить к формированию дополнительных эффектов, например снижению количества вносимых пестицидов и удобрений. Перспективные культуры для повышения их продуктивности методами геномного редактирования в агроэкосистемах Беларуси – лен и рапс, среди животных – крупный рогатый скот (увеличение содержания белка в молоке).

Как отмечалось, активизация работы генов может быть достигнута за счет воздействия внешних факторов, среди которых биостимуляторы различной природы. При этом они могут вноситься как в виде естественных или синтетических химических соединений, так и путем применения микроорганизмов, их продуцирующих. Одни из таких стимуляторов – различные фитогормоны на основе салициловой и β -аминомасляной кислот, брассиностероидов, а также ряд элиситоров, в частности производные бета-1,3-глюкана, не только повышающие продуктивность растений, но и их устойчивость к климатическим стрессам и некоторым болезням.

Так, для зерновых культур при внесении стимуляторов на основе бета-1,3-глюкана установлен комплексный эффект: повышение урожайности (до 15%) и устойчивости к болезням, таким как мучнистая роса; для овощей – снижение заболеваемости фузариозом и мучнистой росой, а также увеличение количества и качества плодов. В посевах льна-долгунца фитостимулятор обеспечил прибавку урожайности льносемян на 1,4 ц/га, общего льноволокна – на 1,3 ц/га и улучшение его качества на 1 номер. В посевах льна масличного отмечен рост урожайности семян на 2 ц/га и масла – на 1 ц/га.



Использование симбиотических организмов как источника фитостимулирующих веществ обеспечивает более пролонгированное воздействие на агроэкосистемы, так как микроорганизмы становятся их составной функциональной частью, а поступление стимуляторов происходит дозированно, в соответствии с естественными биологическими нормами. Кроме того, зачастую применяемые микроорганизмы замещают или вытесняют нежелательную микрофлору, оказывающую негативное влияние на растения.

Среди симбиотических микроорганизмов отдельно хотелось бы выделить ризобактерии и микоризообразующие грибы, формирующие устойчивые ассоциации с растениями через корневую систему. Преимущества таких симбиозов для культур: увеличение площади поглощения воды и минеральных веществ (особенно фосфора и цинка), возможность получения влаги из более глубоких слоев почвы, что определяет повышение засухоустойчивости, а также защиту от ряда патогенов за счет продуцирования микроорганизмами фитозащитных соединений.

Эффективному поступлению фитостимуляторов в растения содействует использование различных макромолекулярных носителей, в том числе и наночастиц, которые с одной стороны характеризуются наилучшей сорбируемостью клетками растений, с другой – обеспечивают постепенное высвобождение активных веществ из их комплексов. Наночастицы в качестве молекулярных носителей уже успешно апробированы и нашли широкое применение для доставки различных видов микроудобрений в растения (препараты серии Наноплант).

Устойчивость агроэкосистем определяется ее способностью сохранять структуру и функции при различных воздействиях. В первую очередь это относится к поддержанию видового богатства (перечень видов и их количественное соотношение), а также функциональности отдельных элементов. Биоразнообразие в агроэкосистемах представляет собой сложную систему взаимосвязей между генетическим спектром агрокультур и сортов, видовым разнообразием растений, животных и микроорганизмов, а также множеством экологических ниш и функциональных групп. Современная парадигма создания устойчивых агроэкоценозов требует перехода от упрощенных монокультурных систем к сложноорганизованным агроэкологическим комплексам, где биоразнообразие становится основным производственным ресурсом.

Для реализации указанной парадигмы, наряду с традиционными методами сохранения биоразнообразия, перспективными технологиями станут

микробиомный инжиниринг, включая дизайн микробных консорциумов и управление ризосферными взаимодействиями; ландшафтная геномика, направленная на анализ адаптивного потенциала и выявления ключевых функциональных генов, а также цифровое моделирование агроэкосистем с последующей разработкой механизма поддержки принятия решений и прогнозирования динамики их структуры.

Защитные свойства растений могут совершенствоваться благодаря аналогичным технологиям повышения продуктивности – CRISPR и TILLING (создание устойчивых к засухе, засолению и патогенам сортов), иммуностимуляции элиситорами (хитином, хитозаном, бета-глюканами), микробным биопленкам с фитозащитным действием, использованию энтомофагов и биоинсектицидов. Дополнительным защитным фактором могут выступать и сторонние элементы, такие как феромонные ловушки и «*push-pull*»-стратегии (введение в состав агроэкосистем дополнительных видов растений, привлекающих или наоборот отпугивающих вредителей), физические или химические барьеры для проникновения патогенов.

Одна из инновационных разработок – формирование органоминеральных нанопокровов на поверхностях различных частей растений. Так, изучение проростков семян пшеницы, обработанных наночастицами серебра, показало, что водные растворы с разными стабилизаторами (полиэтиленгликоль, карбоксиметилцеллюлоза, олеат натрия) и размерами частиц (12–30 нм) в концентрации 500 мг/л стимулируют их развитие. Хорошие результаты дала и предобработка проростков пшеницы, оказавшая защитное действие также и на фотосинтетический аппарат и предотвратившая развитие корневой гнили. Защитно-стимулирующие составы на основе физиологически активных веществ (гуматов, меланоидиновых и кремниевых препаратов, янтарной кислоты, терпеновых кислот) в сочетании с микроэлементами и биопрепаратами (Флавобактерин, Ризобактерин) для предпосевной обработки семян зерновых позволили снизить дозы фунгицидов на 30–50%.

Сходные результаты получены и для льна: предпосевная обработка семян и вегетирующих растений защитно-стимулирующими составами, содержащими наряду с фунгицидами полимеры (ВРП-3, Экогум-филм), регуляторы роста (препараты серии Экосил, Гидрогумат) и микроэлементы в хелатной форме (МикроСил, МикроСтим), обеспечила повышение урожайности и качества льнопродукции.

Полимерные покрытия семян и корневых систем показали свою востребованность не только в усло-

виях агроэкосистем. Яркий пример – посадочный материал лесных культур, корневые системы которого обработаны защитными полимерными составами серии Корпансил, предотвращающими иссушение при пересадке как основную причину снижения приживаемости.

Современный тренд в формировании агроэкологических систем – совершенствование подходов к управлению биоразнообразием, превращение его из пассивного ресурса в активный элемент устойчивого сельского хозяйства. При этом в основу положен принцип трансформации биоразнообразия из экологического актива в основной инновационный капитал агроэкологии. Таким образом, синтез биологических принципов и инновационных технологий создает новую парадигму – Biodiversity-Driven Agriculture – сельское хозяйство, ориентированное на биоразнообразие, где каждый элемент агроэкосистемы становится источником технологических решений. Биоразнообразие в данном ключе является основной базой адаптивных свойств и признаков, которые могут быть ретранслированы через биомиметику (природоподобные технологии), горизонтальный перенос полезных признаков и эмерджентные свойства сложных систем.

Мероприятия по управлению данными процессами могут производиться на различных уровнях организации живой материи: от молекулярного до экосистемного. Первый предусматривает фиксацию, хранение, восстановление и использование генетического материала живых организмов через систему создания биобанков (ДНК-банки, криобанки и др.), которые, кроме ключевой роли в сохранении биоразнообразия, позволяют депонировать генетическое разнообразие редких и исчезающих видов, предоставляют генетический материал для научных исследований, реинтродукции и восстановления популяций, выступают источником генетических ресурсов для будущего использования (например, в медицине, сельском хозяйстве, биотехнологиях).

ДНК-коллекции (банки) растений, животных, микроорганизмов (включая фитопатогены) сформированы во всех учреждениях биологического и аграрного профиля НАН Беларуси, проводящих молекулярно-генетические исследования. Так, по состоянию на 2025 г. Республиканский банк ДНК человека, животных, растений и микроорганизмов Института генетики и цитологии включает 17 423 образца биологического материала, из которых 4259 входят в секцию «Банк ДНК растений». Институтом микробиологии созданы Белорусская коллекция непатогенных микроорганизмов, общий фонд

которой насчитывает свыше 3250 штаммов различных таксономических групп, а также криоколлекции почвенных микробиомов. Криобанки позволяют сохранять уникальные микробные сообщества редких почв (черноземов, торфяников), которые могут быть утрачены из-за антропогенного воздействия и применяться для восстановления деградированных, загрязненных или истощенных земель, имеют высокую востребованность для фундаментальных исследований, нацеленных на изучение эволюции микроорганизмов и их адаптации к изменяющимся условиям.

При сохранении биоразнообразия на экосистемном уровне важным аспектом является не защита отдельных видов, а поддержание сложных природных взаимосвязей, что в значительной степени зависит от оптимального сочетания мероприятий по охране, восстановлению и устойчивому управлению биологическими ресурсами. Это в совокупности обеспечивает долгосрочное функционирование экосистем в условиях глобальных климатических изменений. В качестве примера можно привести эволюционные технологии, включающие направленную коэволюцию растений и их симбионтов – управляемый процесс совместной адаптации культур и их микробных/грибных компонентов для создания устойчивых агроэкосистем. Этот подход имитирует естественные эволюционные этапы, но ускоряет их в 10–100 раз за счет современных биотехнологических инструментов. В результате происходит взаимная адаптация сельскохозяйственных культур и их симбионтов через искусственный отбор в стрессовых условиях, геномное редактирование комплементарных признаков, микробиомное программирование. Направленная коэволюция – сложный, но важный процесс, играющий ключевую роль в формировании агроэкосистем и устойчивом развитии растениеводства и позволяющий создавать саморегулируемые и устойчивые агроэкосистемы, снижать зависимость от агрохимикатов на 40–70%, обеспечивать быструю адаптацию сельского хозяйства к климатическим изменениям.

Следует подчеркнуть, что инновации на основе биологических особенностей живых организмов позволяют повысить продуктивность аграрной отрасли, снизить уровень использования химических препаратов и сохранить природные ресурсы. Комбинации биотехнологий, цифровых решений и экологических практик – эффективный инструмент для формирования устойчивых агросистем будущего. Стабильность последних может быть достигнута только за счет комплексного подхода, сочетающего экологические принципы, современные технологии и адаптивные стратегии. ■