

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК ПО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ НАУКАМ

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОБНЫХ ПРЕПАРАТОВ И УДОБРЕНИЙ ПРИ РАЗВИТИИ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗЕМЛЕДЕЛИИ

© 2025 г. И.А. Тихонович^{а,*}, А.А. Завалин^{б,**}

^аВсероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии,
Санкт-Петербург, Россия

^бВсероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
им. Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия

*E-mail: igor.tikhonovich49@mail.ru

**E-mail: zavalin.52@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2025 г.
После доработки 20.04.2025 г.
Принята к публикации 05.05.2025 г.

В статье рассматриваются микробные препараты и удобрения как элемент природоподобных технологий в сельском хозяйстве. Выращивание растений становится более эффективным благодаря использованию микробно-растительных систем. Генетические факторы растений при этом дополняются полезными генами симбиотической микрофлоры. Описаны механизмы адаптации микросимбионтов к потребностям растения-хозяина. Впервые предложено изготавливать биопрепараты нового поколения на основе эндофитных отселектированных штаммов. Показана целесообразность применения микробных препаратов и химических средств интенсификации земледелия (включая биоминеральные удобрения) для развития природоподобных технологий.

Ключевые слова: микробно-растительные системы, биопрепараты, биомодифицированные удобрения, природоподобные технологии.

DOI: 10.31857/S0869587325060073, **EDN:** FAUMKS

Высокопродуктивное и устойчивое к изменениям природной среды сельское хозяйство находится в числе приоритетных направлений научно-техно-

логического развития, утверждённых Указом Президента РФ от 18 июня 2024 г. № 529. Достижению этой цели способствуют природоподобные технологии [1], которые имитируют природные системы и процессы, могут быть интегрированы в естественный цикл использования ресурсов и наиболее востребованы в агропромышленном комплексе [2].

Природоподобные технологии воспроизводят системы и процессы живой природы в виде технических систем и технологических процессов, интегрированных в естественный природный ресурсооборот [1, 2]. Среди них — интеграция генетических систем микроорганизмов и растений в единую микробно-растительную систему для мобилизации ресурсов микрофлоры, повышения эффективности сельскохозяйственного производства и получения высококачественной продукции с минимальным экологическим риском. Примером может служить биологическая фиксация атмосферного азота клубеньковыми бактериями, находящимися в симбиозе с бобовыми рас-



ТИХОНОВИЧ Игорь Анатольевич — академик РАН, научный руководитель ВНИИСХМ. ЗАВАЛИН Алексей Анатольевич — академик РАН, научный руководитель ВНИИ агрохимии.

тениями, что позволяет заменить энергоёмкие, экологически и взрывоопасные минеральные удобрения биологическим азотом. Несмотря на очевидные преимущества биологического подхода, многие аспекты взаимодействия микробов и растений, в частности, формирование и использование микробно-растительной системы, требуют досконального анализа механизмов сосуществования про- и эукариот в ризосфере и других задействованных в сельском хозяйстве экологических нишах с собственным микробиомом.

Значение микробиома. В последние годы особую актуальность приобретает мобилизация функционала природных почвенных микробиомов, что согласуется с постулатом микробной экологии, который более 100 лет назад сформулировал голландский микробиолог и ботаник М. Бейеринк: “Everything is everywhere, the environment selects” (всё есть везде, но среда отбирает).

По мнению Е.Е. Андропова [3], современные достижения в области почвенной метагеномики позволили оценить реальное разнообразие почвенных микробиомов обширных территорий России. Именно в них кроются решения проблем, с которыми почва сталкивалась на протяжении миллионов лет. В случае чрезвычайной ситуации или экологического кризиса эффективные механизмы селекции помогут в кратчайшие сроки найти решение благодаря компонентам почвенного микробиома [4]. Работы по поиску этих механизмов ведутся по двум основным направлениям: мобилизация существующих решений и поиск механизмов их адаптации к изменяющейся среде. На данный момент установлены закономерности формирования микробных ассоциаций, способных эффективно разлагать растительные остатки. Учёные не только пришли к пониманию технологических основ селекции сообществ, но и раскрыли принципы построения геномов и метагеномов, адаптированных для активного разложения растительных остатков [4]. Микробиомы различных экологических ниш играют роль депозитариев генетической информации, которая в любой момент может быть извлечена оттуда.

Совершенствование коллекции штаммов клубеньковых бактерий. Повысить эффективность выращивания растений можно с помощью традиционных или новых микробно-растительных систем, при этом генетические факторы растений дополняются полезными генами симбиотической микрофлоры. Исследованием функциональной генетической интеграции факультативных внутриклеточных симбиотических систем занимается относительно новое направление — *симбиогенетика* [5]. Во внутриклеточные, азотфиксирующие факультативные симбиозы¹

вступают такие виды-сожители, которые способны выживать вне симбиоза и образуют его только при адекватных условиях окружающей среды и с “разрешения” организма-хозяина. Учёные регулярно наблюдают последовательность событий от узнавания партнёрами друг друга в ризосфере, населённой миллиардами микроорганизмов, до разрушения симбиотических структур по окончании онтогенеза.

Генетические коллекции — залог успешной работы микробиологов и генетиков. В случае факультативного симбиоза коллекция должна состоять из двух частей — пула генов микросимбионта и генов растения-хозяина, вовлечённых во взаимодействие, которое повышает адаптацию микробно-растительной системы к внешним условиям (экологическим нишам). При этом фактором эволюции выступает способность к симбиозу, а не его эффективность. Таким образом, наиболее важные гены эффективности в ходе селекции могут теряться [6]. Для поиска таких симбиотических факторов были впервые изучены микросимбионты реликтовых бобовых. Как и предполагалось, эти микроорганизмы отличаются большим биоразнообразием и обладают значительно более широким пулом генов, влияющих на успешность симбиоза, по сравнению со штаммами, выделенными из окультуренных растений [7]. Была сформирована обширная коллекция реликтовых микросимбионтов с уникальными комбинациями генов, ответственных за становление симбиотических отношений и влияющих на их эффективность. Выделены микробные консорциумы, в которых разные штаммы и виды бактерий в процессе симбиоза выполняют взаимодополняющие задачи, что повышает симбиотическую эффективность в 1.5–2 раза [8].

Получены новые возможности для генетического конструирования эффективных штаммов для производства биопрепаратов с инновационными хозяйственно ценными характеристиками путём включения в селекционный процесс реликтовых микроорганизмов с редкими аллелями симбиотических генов. Отметим, что это открытие согласуется с концепцией центров происхождения культурных растений Н.И. Вавилова [9], где присутствует генетическое разнообразие не только растений, но и микросимбионтов, эволюционирующих совместно с хозяином. В связи с этим необходимы адекватные методы долгосрочного поддержания коллекции в генетически стабильном состоянии. Для этого разработаны роботизированные системы, в частности, станция низкотемпературного автоматизированного хранения биологических образцов при -80°C , где сберегают Ведомственную коллекцию полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения Россельхозакадемии (ВКСМ) — основу коллекции ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии (ВНИИСХМ). Станция предполагает использование компьютерных ключей для доступа к штаммам, работает по принципу криобанка и по-

¹ Факультативный симбиоз — форма симбиоза, при которой совместное существование взаимовыгодно, но, в отличие от облигатного симбиоза (где сосуществование организмов жизненно необходимо для каждого из них), не является обязательным, то есть каждый организм при отсутствии партнёра может жить самостоятельно.

зволяет развивать цепочки автоматизированных процессов, связанных с операциями по контролю качества поддерживаемых генетических ресурсов. Благодаря этому коллекция снабжает штаммами более 80 различных партнёров, которые находят необходимый генетический материал среди десятков тысяч образцов.

Ещё один источник пополнения коллекционного фонда — дикорастущие бобовые растения Крайнего Севера России, что прописано в Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия [10, 11]. На данный момент в коллекции ВКСМ при ВНИИСХМ депонировано более 200 штаммов ризобий, выделенных из дикорастущих бобовых растений Арктики и обладающих ценными практическими свойствами.

Адаптация микробно-растительных систем к потребностям микросимбионта. Закономерности образования микробно-растительных систем распространяются и на ассоциативный симбиоз² ризосферной микрофлоры с небобовыми растениями. Академик С.П. Костычев писал: “Вокруг корней каждого определённого зелёного растения в почве располагаются специальные микробы, привыкшие к выделениям, производимым этими корнями; в сообществе с ними растение чувствует себя прекрасно. Но если по каким-нибудь причинам вместо обычных соседей, вытесняя их, начнут поселяться различные непрошенные гости, зелёное растение чувствует себя болезненно” [12, с. 336, 337].

Установлена изменчивость растений по составу корневых выделений [12]. В частности, диплоидные пшеницы выбрасывают углерод в основном в виде органических кислот, тогда как интенсивные современные сорта — в виде сахаров [13]. Ризобактерии активно заселяют корневую систему примитивной пшеницы, гораздо эффективнее используя корневые выделения, обогащённые органическими кислотами. Такие микробно-растительные системы приобретают полезные свойства, например, способность противостоять патогенным микроорганизмам [14]. Тем не менее селекционеры пока не используют регуляцию состава корневых выделений в своих исследованиях.

Эндифиты. Кроме ризосферной микрофлоры, с растениями пребывают эндифиты — микроорганизмы, населяющие ткани живых растений и обуславливающие важные свойства микробно-расти-

тельных систем [15]. Они используют внутреннюю среду растения — эндосферу — в качестве уникальной экологической ниши, которая сформировалась в результате миллионов лет совместной эволюции и защищает его от неблагоприятных факторов внешней среды. Во ВНИИСХМ впервые в мире стали рассматривать эндифитные бактерии как основу новых биопрепаратов. Они колонизируют те же экологические ниши в растениях, что и болезнетворные микроорганизмы, и поэтому являются перспективным биологическим средством для борьбы с фитопатогенами, так называемым “биоконтрольным” агентом [15]. Установлено, что бактериальные эндифиты способны ингибировать развитие насекомых-фитофагов и нематод путём синтеза биологически активных соединений, обладающих антипатогенным действием. Изучение такого биохимического оружия позволит выделить и идентифицировать химические соединения, которые могут использоваться при создании новых препаратов для борьбы с болезнями растений, животных и даже человека.

Эндифиты оптимизируют азотное и фосфорное питание растений, продуцируют ауксины, витамины и сидерофоры. Кроме того, они могут регулировать осмотическое давление, работу устьиц и модифицировать развитие корневой системы, улучшая общее состояние растений. В связи с этим целесообразно разрабатывать экономически обоснованные приёмы использования данного свойства в различных областях растениеводства. Отметим, что для максимальной эффективности микробных препаратов необходимо проводить не только отбор бактерий из эндосферы растений, но и заниматься селекцией высококомплемментарных (восприимчивых) к взаимодействию с микроорганизмами видов/сортов сельскохозяйственных растений.

Особенности симбиотических генов хозяина. Генетическая коллекция содержит в основном регуляторные гены растений-хозяев, которые определяют судьбу бактериальной клетки, проникающей в корневую волосок через инфекционную нить [16]. В отсутствие сигналов клубеньковых бактерий эти гены не экспрессируются и поэтому определяют признаки, которые не проявляются вне симбиоза. ВНИИСХМ располагает наиболее полной коллекцией мутантов симбиотических генов, в основном гороха. Их количество невелико, однако они играют важнейшую роль во взаимодействии растений и микробов, например, при взаимном узнавании партнёров.

Формирование симбиотических отношений между бобовыми растениями и клубеньковыми бактериями начинается с обмена сигналами [17], инициативную роль в которых играют флавоны и флавоноиды растений. В ответ на их появление в ризосфере начинают экспрессироваться гены синтеза сигнальных молекул клубеньковых бактерий,

² Ассоциативный симбиоз — это многокомпонентная система, включающая хозяина в качестве макропартнёра, стабильного доминантного микросимбионта (нормальная микрофлора) и минорных ассоциированных микросимбионтов (патогенные, условно-патогенные и другие микроорганизмы). При этом организм-хозяин является центром системы, а доминантный партнёр и сопутствующие ассоциативные компоненты регулируют жизнеспособность симбиоза.

производящих специфичные для разных бобовых сигнальные молекулы — Nod-факторы с уникальной структурой. Nod-факторы, будучи признанными и связанными рецепторными киназами растений, стимулируют работу компонентов сигнального пути, что активирует экспрессию целевых генов. Некоторые из них изучают во ВНИИСХМ под руководством Е.А. Долгих [18]. Эти белки контролируют ряд ранних реакций растений, обуславливающих проникновение ризобий в клетки корня и формирование нового симбиотического органа — корневого клубенька. Оpozнание Nod-фактора вызывает сигнальный каскад, обеспечивающий передачу информации в ядро клетки путём индукции кальциевых всплесков. В ядре происходит декодирование сигнала посредством активации кальций-кальмодулин-зависимой киназы DM13, которая, в свою очередь, активирует регуляторы транскрипции (IPD3, NSP1, NSP2, NIN), определяющие экспрессию генов-мишеней симбиотических факторов. Генетический контроль образования клубеньков тесно связан с микоризным симбиозом [17].

Грибы арбускулярной микоризы (АМ) также выделяют сигнальные молекулы — Мус-факторы, которые воспринимаются специальными рецепторами и активируют комплекс схожих регуляторов в клетке. Набор этих регуляторов назван “общим сигнальным путём” для клубеньковых бактерий и грибов (AM DM12, DM11, CNGC15, DELLA1, IPD3, NSP1, NSP2). Возникает вопрос, как растение различает эти общие для разных симбиозов сигнальные пути. Механизм пока не расшифрован, но определён ряд белков-кандидатов на участие в регуляции. В частности, описаны гетеротримерные G-белки, которые могут непосредственно взаимодействовать с рецепторами, что приводит к диссоциации комплекса субъединиц G-белка и дальнейшей передаче сигнала [18]. Так происходит в клетках животных, но практически не исследовано у растений. Выявление этих механизмов вносит важный вклад в изучение сигнальных путей. На данный момент можно констатировать, что главную роль в формировании симбиотических структур играют регуляторные гены, в частности, транскрипционные регуляторы, и им должно быть уделено особое внимание при создании небобовых растений, способных к симбиотической азотфиксации. Описанные механизмы можно сравнить с симфоническим оркестром, в котором одни и те же инструменты играют разные мелодии в зависимости от партитуры и дирижёра.

Сигналинг и специфичность. Фундаментальные исследования молекулярно-генетических механизмов узнавания друг друга партнёрами по симбиозу имеют важное практическое значение. Суть проблемы была сформулирована академиком Д.Н. Прянишниковым ещё в прошлом веке, но только сейчас мы подошли к её решению: “Нельзя сказать, чтобы азотистые удобрения на эти растения совершенно

не действовали... Обильное снабжение бобовых нитратами... может даже действовать неблагоприятно” [19, с. 303]. “Замечено, что после того, как произошло заражение корней какой-либо расой клубеньковых бактерий, проникновение в них других бактерий затрудняется. Следовательно, если в почве имеются малоактивные... бактерии, то первоначальное заражение ими может тормозить деятельность более активных рас, хотя бы они и были в почве” [19, с. 338]. Таким образом, возникла необходимость сужения специфичности взаимодействия и исключения неэффективных штаммов, обитающих в ризосфере, даже если они того же вида, что и “окультуренные” штаммы. Эта задача решается во ВНИИСХМ в рамках проекта “Создание микробно-растительной системы на базе гороха и клубеньковых бактерий с суженной специфичностью и повышенной отзывчивостью на эффективные штаммы (Умный горох)” совместно с научно-технологическим университетом “Сириус”. Изучается возможность управления специфичностью для повышения урожайности гороха при применении биопрепаратов, содержащих эффективные клубеньковые бактерии.

В рамках проекта РНФ “Молекулярно-генетические основы симбиотической отзывчивости гороха посевного (*Pisum sativum* L.)” рассматривается реакция растений на инокуляцию клубеньковыми бактериями и грибами арбускулярной микоризы [20]. Цель проекта — создать технологии получения сортов гороха с искусственно суженной специфичностью взаимодействия с клубеньковыми бактериями, что позволит защитить растения от аборигенной микрофлоры и обеспечить образование клубеньков только с высокоэффективными штаммами, поступающими с биопрепаратами. Важным шагом к достижению этого свойства стало определение структуры рецептора. Одновременно был создан молекулярный маркер, позволяющий вести селекцию классическими методами доноров признака узкой специфичности [21]. На данное изобретение получен патент РФ № 2815453 от 21.10.2023 г.

Полевой эксперимент показал, что интрогрессия нужных аллелей гена *Sym2* в геном гороха сорта Рондо обеспечивает проникновение нужных штаммов в 95% клубеньков. У исходного сорта данный штамм оккупировал лишь 7% клубеньков. Оказалось, что для опознания эффективных штаммов нужно в LysM1-домене рецептора заменить гуанин на пролин в положении 299 экзона 1 [22–24]. Заменить нуклеотид в гене можно с помощью модификации системы CRISPR/Cas9 — системы Prime editing, которую сейчас адаптируют во ВНИИСХМ к использованию на бобовых растениях. В отличие от классического метода CRISPR/Cas9, система Prime editing позволяет не просто сломать ген, но также внести в него желаемое изменение. Для этого были подобраны мишень рядом с местом внесения

мутации и матрица для обратной транскрипции, содержащая изменённый нуклеотид. Далее был разработан дизайн будущих конструкций. Исходный вектор, предназначенный для редактирования однодольных, был модифицирован путём поставки Cas9 и внесения обратной транскриптазы под контроль промотора, который работает в горохе. Затем был сконструирован вектор для редактирования гена рецептора *LykX*. Вектор содержит ген никазы Cas9, сшитый с геном обратной транскриптазы, модуль для экспрессии *pegRNA* (prime editing guide RNA) и последовательности, необходимые для агробактериальной трансформации. Изменённый таким образом рецептор способен связываться только со специфической бактериальной сигнальной молекулой (Nod-фактор), в структуру которой был внедрён остаток фукозы. Такие сигнальные молекулы не встречаются в дикой природе, поэтому только избранные штаммы могут образовывать клубеньки на растениях с отредактированным рецептором.

Следующий этап на пути к управлению специфичностью — получение трансгенных растений. Бобовые с трудом трансформируются, во многом из-за низкой способности к регенерации. Далеко не все генотипы гороха способны регенерировать побеги или соматические эмбрионы из каллусов. Одним из возможных решений этой проблемы могут стать морфогенетические регуляторы, которые исследуются в лаборатории генетики и биотехнологии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) под руководством профессора Л.А. Лутовой. Это гены, кодирующие стимуляторы регенерации, в основном регуляторы развития меристем. Их можно добавить в конструкцию для трансформации или редактирования, и тогда трансформированные клетки будут активно делиться и образовывать новые растения за счёт экспрессии гена морфогенетического регулятора. Один из таких регуляторов — ген *MtWOX9-1* — был обнаружен у люцерны. Его сверхэкспрессия значительно повышает эффективность трансформации. Для оценки работы известных морфогенетических регуляторов у гороха и поиска новых регуляторов была составлена система трансформации зрелых семян, с помощью которой можно получать трансгенные ткани в системе *in vitro*. Однако применяемый способ окрашивания не позволяет сохранить живую трансгенную ткань, поэтому были подобраны витальные флуоресцентные маркеры *DsRed* и *GFP*, которые можно использовать для отбора трансгенных тканей гороха.

Проверка мишеней осуществляется путём получения трансгенных корней. Этот метод позволяет в короткие сроки получить трансгенные ткани, в данном случае со встроенной последовательностью для редактирования. С помощью мишени можно оценить эффективность редактирования в трансгенных корнях. Кроме того, их получение с помощью *Agrobacterium rhizogenes* будет полезным в новом методе редактирования с использованием

дальнего транспорта мРНК Cas9 и гидовой РНК. В этом случае к генам, кодирующим Cas9 и гидовую РНК, пришивают специальные последовательности (TLS), которые позволяют РНК перемещаться по растению из корня в побег. Имея растение с трансгенными корнями, можно редактировать его побег, при этом сам побег и семена остаются нетрансгенными. Таким образом, разработана схема получения платформы для геномного редактирования бобовых растений, что открывает новые перспективы для регуляции симбиотической азотфиксации.

Совместное применения микробных препаратов и агрохимикатов. Быстрый рост численности населения планеты обуславливает интенсификацию сельскохозяйственного производства. Серьёзную угрозу растениеводству несут сорняки и насекомые-вредители. В последние годы значительно возросло количество вносимых на поля химических пестицидов. При этом не вполне ясно их влияние на растения, в частности, на симбиоз бобовых с клубеньковыми бактериями, играющий важнейшую роль в развитии экологического сельского хозяйства.

Сотрудники лаборатории молекулярной и клеточной биологии ВНИИСХМ изучили действие гербицидов Спрут Экстра (глифосат), Форвард (квизалоп-П-этил) и инсектицидов Имидор Про (имидаклоприд), Фаскорд (альфа-циперметрин) на развитие симбиотических клубеньков гороха [25]. Удалось выявить ряд аномалий на ультраструктурном уровне, которые могут служить цитологическими маркерами влияния пестицидного стресса на симбиотические клубеньки. Под руководством профессора В.Е. Цыганова выявлены следующие аномалии: нарушения структуры клеточной стенки, появление разнообразных включений в вакуолях, а также стресс-индуцированные изменения бактериоидов с их дальнейшей деградацией, специфические аномалии в ультраструктуре клубеньков гороха, возникающие только при одном или нескольких вариантах обработки пестицидами. Обработка растений гербицидами Спрут Экстра и Форвард, а также инсектицидом Фаскорд имеет своим следствием конденсацию хроматина в ядрах клеток. Инсектицид Имидор Про приводит к уникальному явлению — увеличению размера инфекционных капель в клубеньках.

Отметим, что упомянутые гербициды и инсектициды различаются по степени негативного влияния на растения и клубеньки. Так, гербицид Спрут Экстра сильнее влияет на клубеньки, чем Форвард, а из двух инсектицидов наибольший негативный эффект оказывает Имидор Про [26]. Также были обнаружены нарушения транскрипционных профилей в клубеньках, обработанных пестицидами Спрут Экстра и Имидор Про, которые связаны с изменением экспрессии генов, контролирующих модификацию клеточной стенки, защитные реакции

и гистоны [25]. Для оптимального использования химикатов в сельском хозяйстве необходимо более глубокое понимание причин неблагоприятного воздействия пестицидов на бобовые культуры [26].

Биоминеральные удобрения. Консенсус между химией и микробиологией возможен путём создания более эффективных удобрений, обработанных активными штаммами [27], которые получены в СПбГУ совместно с индустриальным партнёром ООО “Евробиохим”. Разработан новый тип минеральных удобрений — биоминеральные удобрения нового поколения, которые повышают урожайность культур до 20%, уменьшают нормы внесения в почву без снижения продуктивности. Компания “Евробиохим” в сотрудничестве с ВНИИСХМ и СПбГУ разработала линейку препаратов для биомодификации минеральных удобрений с повышенной эффективностью (на 25–50%). Показано, что споровые формы бактерий хорошо сохраняются на биомодификаторах в течение 12 месяцев. Была заложена основа новой отрасли — производства биоминеральных удобрений, которые, наряду с высокой усвояемостью, более экологичны. Разработано 10 марок биомодификаторов, специализированных под азотные, фосфорные и комплексные NPK-удобрения. Получено 8 патентов РФ, поданы заявки на международное патентование. Заказчики — “ЕвроХим”, “УралХим”, “Акрон”, “ФосАгро”. Технология испытана на площади 82 тыс. га, в 2025 г. планируется обработать до 100 тыс. га. На стадии проектирования находится комплекс для производства 2 тыс. т бимодификатора и 1 млн т биоминеральных удобрений (на 5 млн га). Технология обладает экспортным потенциалом, налажено сотрудничество со странами Средней и Юго-Восточной Азии, Аравийского полуострова. Средняя цена производителей азотных удобрений — 28 тыс. руб. за 1 тонну (на внутреннем рынке — 19.4 тыс. руб. за тонну, на экспортном — 39.2 тыс. руб.).

Перспективы использования микробных препаратов. В настоящее время для практического применения полезных микроорганизмов доступны: инокулянты для основных видов бобовых растений, включая их различные формы и модификации (более 30 препаратов практически для всех бобовых, культивируемых в России); ростостимуляторы и препараты с биоконтрольными свойствами для широкого перечня культур (более 15); вещества с инсектицидными свойствами, а также для борьбы с мышевидными грызунами (более 10) [28]. Препараты широко применяются на территории Российской Федерации и ближнего зарубежья как в традиционном, так и в органическом сельском хозяйстве. Достоверно доказана их высокая эффективность. Ежегодная площадь обработанных микробиологическими препаратами ВНИИСХМ сельскохозяйственных угодий превышает 1.5 млн га, а общий выпуск микробиологической продукции — около 500 т [29]. Отдельно следует упомянуть работы

Ю.В. Лактионова и его коллег во ВНИИСХМ по совершенствованию технологий производства и внесения препаратов. Они позволяют получать инокулюм с содержанием бактерий до 20 млрд клеток на 1 мл, сохраняющих свою активность до полугода и допускающих нанесение на семена одновременно с высевом или заранее с активностью до нескольких суток.

Несмотря на высокую конкуренцию применение микробиологических средств ВНИИСХМ, в том числе инокулянтов-азотфиксаторов, будет расширяться. По сути, рынок сбыта инокулянтов охватывает все посевные площади бобовых культур в России. По данным за 2024 г. под зерновые и зернобобовые культуры было занято 46 млн га, в частности под зернобобовые (горох, нут, чечевица, фасоль) — 4.2 млн га, сою — 4.36 млн га [30]. Потенциальный объём производства биопрепаратов-азотфиксаторов для нута, сои и гороха на ближайшие годы, учитывая прогнозную посевную площадь данных культур не менее 7 млн га, — более 2 млн литров (2.5–3 млрд руб.).

Подводя итог, напомним, что в постановлении бюро Отделения сельскохозяйственных наук РАН от 27 февраля 2025 г. говорилось, что развитие биотехнологических производств микробных препаратов для земледелия и других отраслей АПК не соответствует современным потребностям, хотя есть предпосылки для значительного увеличения отечественного рынка и импортозамещения. Сейчас активно формируется спрос на микробиологические препараты и другие средства, стимулирующие рост и развитие растений. Укрепить сельскохозяйственную отрасль можно путём использования микробно-растительных систем, изучение которых вносит весомый вклад в понимание фундаментальных механизмов симбиоза про- и эукариот.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование подготовлено в рамках гранта Научного центра мирового уровня “Агротехнологии будущего” и гранта РФФ 24-16-00068.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность В.Е. Цыганову, А.В. Цыгановой, Е.А. Долгих, В.И. Сафроновой, А.А. Белимову, В.А. Жукову, Е.Е. Андронову, В.К. Чеботарю, Ю.В. Лактионову, М.Л. Румянцевой, Л.А. Лутовой, В.Е. Твороговой, А.А. Алфёрову, Л.С. Черновой за предоставленные материалы, а также И.А. Колесник за помощь в подготовке рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755> (дата обращения 13.02.2025).

2. Поляков В.В. Природоподобные технологии как инновационный ответ на вызовы XXI века // Экономика и экология территориальных образований. 2024. Т. 8 (3). С. 27–33.
Polyakov V.V. Nature-like technologies as an innovative response to the challenges of the 21st century // Economics and ecology of territorial entities. 2024, vol. 8 (3), pp. 27–33. (In Russ.)
3. Zverev A.O., Kimeklis A.K., Orlova O.V. et al. Creation of Cellulolytic Communities of Soil Microorganisms – A Search for Optimal Approaches // Microorganisms 2024, vol. 12, no. 11, 2276.
4. Kimeklis A.K., Gladkov G.V., Orlova O.V. et al. Metagenomic insights into the development of microbial communities of straw and leaf composts // Front Microbiol. 2025, vol. 15, 1485353.
5. Проворов Н.А., Тихонович И.А. Сельскохозяйственная микробиология и симбиогенетика: синтез классических идей и конструирование высокопродуктивных агроценозов (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2022. № 5. С. 821–831.
Provorov N.A., Tikhonovich I.A. Agricultural microbiology and symbiogenetics: synthesis of classical ideas and construction of highly productive agro-cenoses (review) // Agricultural Biology. 2022, no. 5, pp. 821–831. (In Russ.)
6. Safronova V.I., Guro P.V., Sazanova A.L. et al. Rhizobial Microsymbionts of Kamchatka *Oxytropis* Species Possess Genes of the Type III and VI Secretion Systems, Which Can Affect the Development of Symbiosis // Mol. Plant–Microbe Interact. 2020, vol. 33 (10), pp. 1232–1241.
7. Safronova V., Sazanova A., Kuznetsova I. et al. Increasing the Legume–Rhizobia Symbiotic Efficiency Due to the Synergy between Commercial Strains and Strains Isolated from Relict Symbiotic Systems // Agronomy. 2021, vol. 11 (7), 1398.
8. Safronova V., Sazanova A., Belimov A. et al. Synergy between Rhizobial Co-Microsymbionts Leads to an Increase in the Efficiency of Plant–Microbe Interactions // Microorganisms. 2023, vol. 11, 1206.
9. Вавилов Н.И. Центры происхождения культурных растений. Избранные произведения в 2-х т. Ленинград: Наука, 1967. С. 89–202.
Vavilov N.I. Centers of origin of cultivated plants. Selected works in 2 vols. Leningrad: Nauka, 1967. Pp. 89–202. (In Russ.)
10. Кузнецова И.Г., Карлов Д.С., Гуро П.В. и др. Генетическое разнообразие и симбиотическая эффективность клубеньковых микросимбионтов остролодочника таймырского (*Oxytropis taimyrensis* (Jurtz.) A. et D. Love), астрагала холодного (*Astragalus frigidus* (L.) A. Gray) и астрагала тугаринова (*Astragalus tugarinovii* Basil.) из Арктической Якутии // Сельскохозяйственная биология. 2024. № 5. С. 927–942.
Kuznetsova I.G., Karlov D.C., Guro P.V. et al. The genetic diversity and symbiotic efficiency of the nodule microsymbionts isolated from *Oxytropis taimyrensis* (Jurtz.) A. et D. Love, *Astragalus frigidus* (L.) A. Gray and *Astragalus tugarinovii* Basil. from Arctic Yakutia // Agricultural biology. 2024, no. 5, pp. 927–942. (In Russ.)
11. Kuznetsova I.G., Karlov D.S., Sazanova A.L. et al. Genetic Diversity of Microsymbionts of Legumes *Lathyrus pratensis* L., *Vicia cracca* L., *Trifolium repens* L., and *Astragalus schelichowii* Turcz. Growing Near Norilsk in Arctic Russia // Russ. J. Plant Physiol. 2023, vol. 70, 187.
12. Костычев С.П. Избранные труды по физиологии и биохимии микроорганизмов. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 510 с.
Kostychev S.P. Selected works on the physiology and biochemistry of microorganisms. Vol. 1, 2. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1956. (In Russ.)
13. Шапошников А.И., Моргунов А., Акин Б. и др. Сравнительные характеристики корневых систем и корневой экссудации синтетического, примитивного и современного сортов пшеницы // Сельскохозяйственная биология. 2016. № 1. С. 58–78.
Shaposhnikov A.I., Morgunov A., Akin B. et al. Comparative characteristics of root systems and root exudation of synthetic, landrace and modern wheat varieties // Agricultural biology. 2016, no. 1, pp. 58–78. (In Russ.)
14. Шапошников А.И., Белимов А.А., Азарова Т.С. и др. Взаимосвязь состава корневых экссудатов и эффективности взаимодействия растений пшеницы с микроорганизмами // Прикладная биохимия и микробиология. 2023. № 3. С. 260–274.
Shaposhnikov A.I., Belimov A.A., Azarova T.S. et al. Relationship between the Composition of Root Exudates and the Efficiency of Interaction of Wheat Plants with Microorganisms // Applied Biochemistry and Microbiology. 2023, no. 3, pp. 260–274. (In Russ.)
15. Chebotar V.K., Gancheva M.S., Chizhevskaya E.P. et al. Endophyte *Bacillus vallismortis* BL01 to Control Fungal and Bacterial Phytopathogens of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Plants // Horticulturae. 2024, vol. 10 (10), 1095.
16. Tsyganov V.E., Tsyganova A.V. Symbiotic regulatory genes controlling nodule development in *Pisum sativum* L. // Plants. 2020, vol. 9, no. 12, 1741.
17. Тихонович И.А., Проворов Н.А. Симбиозы растений и микроорганизмов: молекулярная генетика агросистем будущего. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2009.
Tikhonovich I.A., Provorov N.A. Symbioses of plants and microorganisms: molecular genetics of agricultural systems of the future. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2009. (In Russ.)
18. Bovin A.D., Pavlova O.A., Dolgikh A.V. et al. The role of heterotrimeric G-protein beta subunits during

- nodulation in *Medicago truncatula* Gaertn and *Pisum sativum* L. // *Frontiers in Plant Science*. 2022, vol. 12, 808573.
19. Прынишников Д.Н. Избранные сочинения. Т. 1. Агрохимия. М.: Колос, 1965.
Pryanishnikov D.N. Selected works. Vol. 1. Agrochemistry. Moscow: Kolos, 1965. (In Russ.)
 20. Sulima A.S., Zhukov V.A., Kulaeva O.A. et al. New sources of *Sym2⁴* allele in the pea (*Pisum sativum* L.) carry the unique variant of candidate LysM-RLK gene *LykX* // *PeerJ*. 2019, vol. 7, e8070.
 21. Sulima A.S., Zhuravlev I.Y., Alexeeva E.A. et al. The Genomic and Phenotypic Characterization of the *Sym2⁴* Introgression Line A33. 18 of Pea (*Pisum sativum* L.) with the Increased Specificity of Root Nodule Symbiosis // *Plants*. 2025, vol. 14, no. 3, 427.
 22. Kuzmina D.O., Zorin E.A., Sulima A.S. et al. Transcriptomic analysis of the symbiotic responsivity trait in pea (*Pisum sativum* L.) // *Vavilov J. Genet. Breed*. 2025, vol. 29, no. 2, pp. 248–258.
 23. Tvorogova V.E., Fedorova Y.A., Potsenkovskaya E.A. et al. The WUSCHEL-related homeobox transcription factor MtWOX9-1 stimulates somatic embryogenesis in *Medicago truncatula* // *Plant Cell Tiss. Organ Cult*. 2019, vol. 138, 517–527.
 24. Yakovleva D.V., Efremova E.P., Smirnov K.V. et al. The WOX Genes from the Intermediate Clade: Influence on the Somatic Embryogenesis in *Medicago truncatula* // *Plants*. 2024, vol. 13, 223.
 25. Gorshkov A.P., Kusakin P.G., Borisov Y.G. et al. Effect of herbicides Sprut Extra (glyphosate) and Forward (quizalofop-P-ethyl) on the development of pea (*Pisum sativum* L.) symbiotic nodules // *Symbiosis*. 2024, vol. 94, pp. 191–206.
 26. Gorshkov A.P., Kusakin P.G., Vorobiev M.G. et al. Effect of insecticides Imidacloprid and Alpha-Циперметрин on the development of pea (*Pisum sativum* L.) nodules // *Plants*. 2024, vol. 13, no. 23, 3439.
 27. Аналитический обзор рынка инокулянтов (2023–2025). <https://agroinvestor.ru/analytics>
Analytical review of the inoculant market (2023–2025). (In Russ.)
 28. Рыночные исследования биопрепаратов в РФ. <https://ab-centre.ru/>
Market research of biological products in the Russian Federation. (In Russ.)
 29. Минсельхоз России. Оперативные данные о посевных площадях в 2024 г. <https://mcx.gov.ru>
The Ministry of Agriculture of Russia. Operational data on acreage in 2024. (In Russ.)
 30. Росстат. Посевные площади сельскохозяйственных культур в Российской Федерации на 2024 г. <https://rosstat.gov.ru/>
Rosstat. Acreage of agricultural crops in the Russian Federation for 2024. (In Russ.)

INTEGRATED USE OF MICROBIAL PREPARATIONS AND FERTILIZERS IN THE DEVELOPMENT OF NATURE-LIKE TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE

I.A. Tikhonovich^{a,*}, A.A. Zavalin^{b,**}

^aAll-Russian Scientific Research Institute for Agricultural Microbiology,
St. Petersburg, Russia

^bAll-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry
named after D.N. Pryanishnikov, Moscow, Russia

*E-mail: igor.tikhonovich49@mail.ru

**E-mail: zavalin.52@mail.ru

The article discusses microbial preparations and fertilizers as an element of nature-like technologies in agriculture. Plant cultivation becomes more efficient due to the use of microbial-plant systems. Genetic factors of plants are supplemented with useful genes of symbiotic microflora. The mechanisms of adaptation of microsymbionts to the needs of the host plant are described. For the first time, it is proposed to produce new-generation biopreparations based on endophytic selected strains. The expediency of using microbial preparations and chemical means of intensification of agriculture (including biomineral fertilizers) for the development of nature-like technologies is shown.

Keywords: microbial and plant systems, biological products, biomodified fertilizers, nature-like technologies.