

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОТФИКСИРУЮЩИХ И ФИТОСТИМУЛИРУЮЩИХ МИКРООРГАНИЗМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА И УЛУЧШЕНИЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В РФ

И.А. Тихонович, акад. РАН, ВНИИСХМ, А.А. Завалин, чл.-корр. РАН, ВНИИА

Концепция устойчивого развития АПК предусматривает удовлетворение потребностей общества на фоне сохранения нормального состояния биосферы. Необходим переход от антропоцентрической ориентации природопользования к природоохранной. Для сохранения плодородия почвы и предотвращения наиболее опасных видов ее деградации предусмотрена экологически безопасная направленность землепользования, основанная на необходимости максимально возможного приближения земледелия к естественно-природным аналогам при поддержании высокой продуктивности сельскохозяйственного производства, оптимизированных технологий возделывания сельскохозяйственных культур. В нем особую роль занимает биологический азот, поскольку более 70-90% азота пахотных почв и почти весь его запас в естественных агроценозах фиксируется из атмосферы симбиотическими, ассоциативными и свободноживущими микроорганизмами. В общем объеме биологического азота основная его доля принадлежит фиксированному клубеньковыми бактериями на корнях бобовых растений и примерно 1/3 приходится на азот, фиксированный ассоциативными микроорганизмами в ризосфере небобовых растений. Д.Н. Прянишников, отмечая важность технического и биологического источников азота в питании растений, считал, что они взаимно дополняют друг друга [1]. По данным ФАО, вклад биологической фиксации азота в сельскохозяйственное производство примерно вдвое превосходит химические азотные удобрения, а в ежегодном потоке азота на земной суше почти в 3 раза больше азота минеральных удобрений.

Общие масштабы суммарной годовой продукции биологической азотфиксации в наземных экосистемах составляют 175-200 млн т, из которых 99-110 млн т обеспечивают сельхозугодья. С учетом коэффициента использования азота удобрений (не более 50% для минеральных и около 15-30% для органических) сельскохозяйственные растения получают из этих источников 30-35 млн т азота в год, а ежегодный вынос его из почвы с продукцией сельского хозяйства составляет около 110 млн т. Следовательно, основная масса (70-75%) азота в урожае имеет иное происхождение: это азот биологический и азот минерализующегося органического вещества почвы, также преимущественно микробиологического происхождения. Поэтому азотфиксация выделена наряду с фотосинтезом в



ряд основных физиологических процессов, а биологический азот нужно рассматривать как фактор формирования плодородия почвы и охраны природы, резерв частичной замены технического в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Микробиологическая фиксация атмосферного азота — единственный экологически чистый путь снабжения растений связанным азотом: при этом загрязнение почв, водоемов и атмосферы невозможно. Преимущество биологического азота не только в безвредности. Для его накопления требуются относительно небольшие затраты энергии на активацию азотфиксирующих микроорганизмов. При биологической фиксации источником энергии является, как правило, солнце, фиксированный азот усваивается растениями практически полностью. Недостаток биологической азотфиксации как способа обеспечения растений азотом лишь в том, что человечество еще не научилось эффективно управлять ею.

Возделывание в севооборотах бобовых культур и использование возможностей ассоциативных диазотрофов приближают технологии возделывания сельскохозяйственных культур к естественно-природным фитоценозам. При насыщении севооборотов 25-30% бобовыми культурами создается возможность снабжения растений биологическим азотом при производстве зерна и кормов. За счет пожнивно-корневых остатков бобовых культур (главным образом многолетних бобовых трав) создаются условия сохранения или повышения обеспеченности почвы органическим веществом, улучшаются ее физико-химические свойства, оздоравливается фитосанитарное состояние посевов. При использовании ассоциативных (ризосферных) диазотрофов в зависимости от почвенно-климатических условий в агроценозы вовлекается от 30 до 60 кг/г азота воздуха. Кроме того, интродуцируемые микроорганизмы, используемые для инокуляции бобовых и злаковых культур, стимулируют рост и развитие растений, повышают их устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды, подавляют развитие патогенной микрофлоры.

Поступающий в земледелие в результате азотфиксации биологический азот не требует дополнительных энергетических затрат и существенно снижает экономические, кроме того, имеются явные экологические преимущества. Проблема вовлечения в биологический круговорот азота воздуха охватывает широкий круг направлений: микробиологию, агрохимию, растение-

водство, защиту растений, селекцию, биохимию, физиологию, почвоведение, гидрологию, климатологию.

В настоящее время исследования по биологическому азоту направлены на решение следующих вопросов:

- определение размеров фиксации азота воздуха и коэффициента азотфиксации бобовыми культурами в зависимости от агроэкологических типов земель, структуры посевных площадей, севооборотов, дифференцированной обработки почвы, применения удобрений и агротехнологий;

- оценка роли биологического азота в питании растений и его вклад в формирование урожайности и качества растениеводческой продукции сельскохозяйственных культур, выращиваемых после бобовых предшественников и небобовых культур, инокулированных ассоциативными диазотрофами;

- оптимизация основных параметров факторов среды для реализации потенциальной азотфиксирующей способности симбиотических и ассоциативных систем (реакция почвенного раствора, обеспеченность почвы макро- и микроэлементами минерального питания, а также климатических факторов: температура и инсоляция, влажность почвы и воздуха);

- создание высокоактивных, экологически пластичных штаммов клубеньковых бактерий и ризосферных диазотрофов и разработка оптимизированных технологий применения биопрепаратов в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур;

- определение эффективности инокуляции биопрепаратами в зависимости от генотипических и фенотипических особенностей сельскохозяйственных культур и обоснование предложений для получения новых сортов и гибридов, обладающих повышенной симбиотической и ассоциативной азотфиксацией;

- уточнение механизма биологической фиксации азота, расширяющего познание взаимодействия процессов фотосинтеза и азотфиксации, установление механизмов взаимодействия растений и микроорганизмов и создание на этой основе систем, способных наряду с азотфиксацией осуществлять подавление патогенной микрофлоры для расширения возможностей биологического метода защиты растений, а также стимулирующего воздействия на растения за счет продуцирования микроорганизмами физиологически активных веществ различного спектра действия;

- исследование взаимодействия препаратов диазотрофов и химических средств при обработке семян, а также перспектив применения бинарной инокуляции биопрепаратами с целью повышения азотфиксирующей способности и устойчивости растений к неблагоприятным факторам внешней среды;

- оценка роли бобовых культур в сохранении и повышении содержания органического вещества почвы, определение потоков углерода и азота в ландшафте, а также исследование изменений микробиоценоза почвы при интродукции симбиотических и ассоциативных диазотрофов, применении минеральных удобрений и других факторов воздействия на агроландшафт;

- обоснование необходимости возмещения в почву выноса минеральных элементов (фосфор, калий, кальций, магний и др.) питания растений с отчуждаемым урожаем бобовых культур и небобовыми растениями, инокулированными биопрепаратами, в зависимости от агроэкологического состояния почвы и агроклиматических условий.

Участвуя в круговороте различных веществ, почвенные микроорганизмы обеспечивают устойчивое функционирование экосистемы в целом. Одновременно микроорганизмы являются чувствительным индикатором, отражающим изменение условий среды обитания. От характера воздействия на сукцессии почвенных микроорганизмов (водно-воздушный, тепловой, пищевой режимы и др.), изменяются сложившаяся равновесная система, структура и функции микробиоценоза, его биологическая активность. Различные условия аэрации и обеспеченность пищевыми ресурсами в обрабатываемом слое определяют в каждом случае специфический ход микробиологических процессов распада и синтеза веществ, влияющих на плодородие почвы.

Эволюционно сложившиеся системы растительно-микробных симбиозов были разбалансированы в ходе формирования культурной флоры, поскольку при селекции растений человек взял на себя выполнение ряда их адаптивных функций, применяя различные агротехнические приёмы. Эти подходы позволили существенно повысить продуктивность основных сельскохозяйственных культур [2].

Реальным дополнительным источником являются микробные препараты, органические соединения или растительные экстракты, которые обеспечивают аналогичные функции для растений (питание, защита от патогенов), практически не влияя на экологическую обстановку в агроценозе.

Потребность сельского хозяйства в азотных удобрениях возрастает, но удовлетворяется не полностью из-за их высокой стоимости. Фиксация молекулярного азота из атмосферы – одно из самых мощных средств пополнения азотного фонда почвы и улучшения питания сельскохозяйственных растений, превосходящее по своему объёму производство азотных удобрений. Размеры фиксации атмосферного азота в зависимости от вида растения и климатической зоны колеблются в пределах 3–600 кг/га в год [3].

Усложнение экологической обстановки, рост цен на минеральные удобрения усилили интерес к поиску новых источников питания растений и защиты их от патогенов. Это осуществляется за счёт использования биопрепаратов, обладающих рядом функций, оптимизирующих рост и развитие растений. Действующим началом биопрепаратов являются микроорганизмы. Они оказывают комплексное положительное действие на растения, осуществляют фиксацию атмосферного азота, подавляют развитие фитопатогенных микроорганизмов, стимулируют рост и развитие растений, улучшают их минеральное питание и влагообмен, повышают устойчивость к стрессам. При помощи многоступенчатой селекции из большого количества изолятов микроорганизмов отбирают те, которые положительно действуют на рост и развитие сельскохозяйственных культур и хорошо приживаются в ризосфере или на корнях растений [4].

Современное развитие биотехнологии способствовало появлению нового поколения высокоэффективных биопрепаратов, применяющихся в различных отраслях сельскохозяйственного и промышленного производства. Использование для создания таких препаратов природных штаммов микроорганизмов обеспечивает высокую экологическую безопасность. Прогресс производства и применения биопрепаратов во многом свя-

зан с разработкой высокотехнологичных препаративных форм, сохраняющих долгое время свои исходные свойства. Одним из наиболее удачных путей решения этой проблемы является производство биопрепаратов в жидкой форме.

В соответствии с «Прогнозом потребности и платежеспособного спроса сельского хозяйства Российской Федерации на минеральные удобрения до 2020 г.», по базовому сценарию развития земледелия с учетом прогнозируемых объемов производства продукции питания и технических потребностей рекомендуется применять 7-8 млн т NPK [5].

Характеризуя современное состояние земледелия России, нельзя не отметить неблагоприятное соотношение и отрицательный баланс питательных веществ в земледелии России [6]. С минеральными удобрениями вносится порядка 1,31 млн т азота, с органическими удобрениями - 0,27 млн т. С учетом коэффициента использования азота из этих источников (не более 50% для минеральных и 20% для органических) сельскохозяйственные растения получают примерно 0,71 млн т азота в год, при этом вынос азота из почвы с продукцией сельского хозяйства в среднем за год достигает 3,26 млн т. Большая часть урожая формируется за счет мобилизации почвенного плодородия и биологической фиксации без компенсации выносимых с урожаем элементов питания. Поэтому проблема азотного баланса и азотного питания растений остается одной из центральных. Тезис Д.Н. Прянишникова [1] о важности соразмерять «азотирование наших полей» с помощью культур «азотособирателей» актуален и в наши дни. Накопленный в почве биологический азот бобовых эффективен в течение 3-4 лет для последующих культур, при этом бобовые накапливают в почве лабильное органическое вещество в виде пожнивных-корневых остатков, при разложении которых создается эффективное плодородие почвы [7].

Биологическая фиксация азота при участии микроорганизмов является одним из важнейших процессов трансформации атмосферного азота в биосфере, который лимитирует все остальные звенья цикла азота, имеет планетарное значение и по масштабу сопоставим с фотосинтезом. Сопряженность азотфиксации с фотосинтезом позволяет эффективно использовать солнечную энергию, что дает возможность уменьшить огромные затраты при производстве азотных удобрений. Нельзя не учитывать, что энергозатраты на производство, транспортировку, хранение и внесение удобрений растут значительно быстрее по сравнению с увеличением урожая: повышение урожайности зерновых культур с 20 до 40 ц/га требует увеличения суммы энергозатрат в 10 раз, причем около 45% их приходится на синтез и применение азотных удобрений [8].

Кроме того, микробное связывание молекулярного азота - единственный путь снабжения растений азотом, не ведущий к нарушению экологической среды из-за загрязнения почв, водоемов и атмосферы [3]. Потенциальные размеры симбиотической азотфиксации (при обеспечении оптимальных условий для симбиоза) могут достигать от 130 до 390 кг/га фиксированного азота для зернобобовых культур и от 270 до 550 кг/га для многолетних бобовых трав [9].

Интерес к проблеме микробиологической фиксации атмосферного азота обусловлен не только главной ролью этого процесса в азотном балансе биосферы земли. Ве-

лика роль биологического азота в решении проблемы белка: зернобобовые культуры содержат до 40% белка и до 20% жира. В белковом комплексе бобовых растений преобладают альбумины и глобулины, растворимые в воде и водных солевых растворах [10]. За счет симбиотической азотфиксации бобовыми культурами и заделки в почву их пожнивных-корневых остатков можно не только стабилизировать, но и улучшить основные показатели плодородия почвы. Агрохимическая ценность пожнивных и корневых остатков бобовых растений в том, что в них относительно много азота (1,8-2,8% на сухое вещество). Это способствует их быстрому разложению микроорганизмами и освобождению азота в форме аммиака, подвергающегося в почве быстрой нитрификации [11]. Наряду с азотом, из растительных остатков высвобождаются фосфор, калий, кальций, сера, микроэлементы, что служит важным средством микробиологической мобилизации в почве труднодоступных дефицитных элементов питания для формирования урожайности последующих культур севооборота [12].

Ассоциации растений с микроорганизмами привлекают внимание ученых с точки зрения не только изучения фундаментальных основ сосуществования и взаимодействия различных организмов, но и возможного использования их в практике экологически ориентированного адаптивного растениеводства. Очевидно, что каждый ассоциированный с растением микроорганизм, являясь эволюционно выверенным компонентом сложной растительно-микробной системы, выходящей за рамки одного растения, оказывает существенное влияние на биологическую структуру и функционирование всей системы.

Микроорганизмы, существующие внутри растения, включая надземную, подземную части и семена, и благотворно влияющие на их развитие (эндифитные микроорганизмы), используют внутреннюю среду растения (эндосферу) в качестве уникальной экологической ниши, защищающей их от изменений внешней среды, возникшей в результате сотен миллионов лет совместной эволюции, например, растений и грибов. Эти микроорганизмы могут передаваться из поколения в поколение от предков к потомкам, являясь неотъемлемой частью эндосферы растительного организма. Они способны колонизировать внутренние ткани растения, не вызывая заболеваний и не оказывая отрицательного влияния на его развитие [13]. Из существующих на земле около 300 тыс. видов растений каждый является хозяином для большого количества видов эндифитных микроорганизмов. Использование бактериальных эндифитов открывает новые перспективы по поиску, выделению и характеристике прокариотических микроорганизмов с целью создания новых микробных препаратов для регулирования условий жизни, в том числе азотного питания растений [14]. Эндифитные бактерии колонизируют те же экологические ниши в растениях, что и болезнетворные микроорганизмы, и поэтому служат перспективным биологическим средством для борьбы с фитопатогенами, являясь «био-контрольным» агентом [15].

Важным фактором увеличения вовлечения количества биологического азота в агроценозы является использование биопрепаратов, созданных на основе симбиотических и ассоциативных диазотрофов. Для оценки их влияния на растения проведены исследования на базе учреждений Геосети опытов на широком спектре культур в различных почвенно-климатических зонах. За

40 лет её работы обобщено более 3 тыс. опытов практически со всеми важнейшими сельскохозяйственными культурами, в России и странах СНГ [16]. В экспериментах использовали производственные и перспективные штаммы клубеньковых бактерий из Национальной коллекции *Rhizobium*, выделенные из почв и клубеньков растений различных регионов мира, а также ассоциативные азотфиксирующие бактерии, выделенные из различных почв и ризосфер растений.

Анализ большой выборки испытаний эффективности биопрепаратов на различных культурах выявил спектр эффективности отдельных биопрепаратов. Например, азоризин обеспечивает максимальную прибавку на озимой ржи и рисе, мизорин эффективен для ячменя, флавобактерин - для озимой пшеницы, картофеля и большинства овощных культур. Специфичность действия биопрепаратов не только определяется биологическими особенностями сельскохозяйственных культур, но и варьирует в зависимости от сорта растений. Поэтому возможен подбор биопрепаратов для наиболее распространенных или перспективных сортов. Биопрепараты способствуют существенному повышению продуктивности практически всех изученных сельскохозяйственных культур. При этом прибавка урожайности зерновых составляет в среднем 15-20%, овощных культур - 20-30%.

Эффективным приемом повышения урожайности бобовых и увеличения размеров азотфиксации является инокуляция растений высокоэффективными штаммами клубеньковых бактерий, которая повышает их продуктивность в среднем на 20-50 %. Уровень прибавок урожайности зависит от особенностей культуры, почвенно-микробиологического состояния и погодных условий. В различных климатических условиях ризоторфин обладает высокой эффективностью на широком спектре бобовых культур. Наиболее отзывчивы на инокуляцию чечевица и нут в Ростовской области, где прибавка составила 50 %. Прибавка урожайности растений не единственный критерий продуктивности азотфиксации. Как показано в ряде исследований, наиболее тесная корреляция существует между содержанием или накоплением белка в растениях и размерами фиксации азота.

Одна из наиболее перспективных зернобобовых культур - соя. Инокуляция клубеньковыми бактериями семян сои служит эффективным агроприемом, поскольку в почве могут отсутствовать вирулентные штаммы. При эффективном использовании биопрепаратов важным и часто определяющим фактором является взаимодействие генотипов растений и микроорганизмов. Проведённые исследования показали перспективность координированной селекции растений и микроорганизмов.

В полевых экспериментах, выполненных в опытах Геосети, прибавки урожайности от действия биопрепаратов, созданных с использованием ассоциативных микроорганизмов, на разных типах почв составили у яровой пшеницы 12-18%, ячменя - 17-28, овса - 19-23, озимой пшеницы - 10-22, озимой ржи - 9-10, озимой тритикале - 22-23%. Положительное действие ассоциативных микроорганизмов на урожайность зерновых культур отмечают и на фоне применения полного минерального удобрения. Это связано с тем, что минеральный азот удобрения стимулирует рост растений в начальный период вегетации, когда активность азотфиксирующих бактерий еще относительно не велика из-за малого количества корневых выделений. Затем, с

фазы выхода в трубку, удобренные растения зерновых культур с более развитой корневой системой и более высоким уровнем обмена веществ активизируют микробиологическую активность в ризосфере. В результате сама культура получает дополнительное количество азота и стимуляторов роста - продуктов жизнедеятельности diaзотрофов [17, 18].

В условиях достаточного увлажнения действие ассоциативных биопрепаратов эквивалентно внесению азотного удобрения под озимые пшеницу, рожь и тритикале, ячмень и овес в дозе 30-45 кг/га, под яровую пшеницу - 30-55 кг/га.

Таким образом, существенную роль в привлечении в земледелие дополнительного количества биологического азота играют биологические препараты, созданные с использованием клубеньковых и ассоциативных микроорганизмов, что обеспечивает повышение урожайности бобовых и зерновых культур. По данным полевых опытов с различными сельскохозяйственными культурами, выявлено положительное влияние биопрепаратов на урожайность и качество растениеводческой продукции. Действие биопрепаратов на урожайность растениеводческой продукции практически эквивалентно внесению под культуры N_{30-40} . При использовании биопрепаратов для инокуляции семян сельскохозяйственных культур, выращиваемых на фоне внесения удобрений, эффективность возрастает.

Литература

1. Прянишников Д.Н. Избранные сочинения. В.3 томах. Т. 2. Азот в жизни растений и в земледелии. - М.: Сельхозгиз, 1953. - 494 с.
2. Проворов Н.А., Воробьев Н.И. Генетические основы эволюции растительно-микробных систем / Под ред. И.А. Тихоновича. - С.-Пб.: Информ-Навигатор, 2012. - 400 с.
3. Трепачев Е. П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. - М.: Агроконсалт, 1999. - 532 с.
4. Тихонович И.А., Кожемяков А.П., Чеботарь В.К. и др. Биопрепараты в сельском хозяйстве. - М.: Россельхозакадемия, 2005. - 153 с.
5. Сычев В.Г., Ефремов Е.Н., Завалин А.А. и др. Прогноз потребности и платежеспособного спроса сельского хозяйства Российской Федерации на минеральные удобрения до 2020 года. - М.: ВНИИА, 2012. - 52 с.
6. Иванов А.Л., Завалин А.А. Приоритеты научного обеспечения земледелия // Агрохимия. - 2011. - № 3. - С. 17-23.
7. Вавилов П.П., Посыпанов Г.С. Бобовые культуры и проблема растительного белка. - М.: Россельхозиздат, 1983. - 225 с.
8. Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере. / Под ред. Добровольского Г.В. - М.: Наука, 2003. - 140 с.
9. Кокорина А.Л., Кожемяков А.П. Бобово-ризобийный симбиоз и применение микробиологических препаратов комплексного действия - важный резерв повышения продуктивности пашни. - С.-Петербург: С.-Пб. ГАУ, 2010. - 50 с.
10. Персикова Т.Ф., Цыганов А.Р., Вильдфлуш И.Р. Биологический азот в земледелии Беларуси. - Минск: Изд-во Хата, 2003. - 238 с.
11. Мишустин Е.Н., Черепков Н.И. Д.Н.Прянишников и проблема биологического азота в земледелии. Кн.: Современное развитие научных идей Д.Н. Прянишникова. - М.: Наука, 1991. - С. 50-64.
12. Лукин С.М. Значение биологической азотфиксации бобовых в балансе азота в земледелии Нечерноземной зоны России // Агрохимия. - 1995. - № 8. - С.11-17.
13. Schulz B., Boyle C. What are endophytes? / Schulz B., Boyle C.J.C., Sieber T.N. (Ed.) Microbial Root Endophytes. Berlin: Springer-Verlag, 2006. P. 191-206.
14. Ryan R.P., Germaine K., Franks A., Ryan D.J., Dowling D.N. Bacterial endophytes: recent developments and applications // FEMS Microbiol. Lett. 2008. V. 278. P. 1-9.
15. Azevedo J.L., Maccheroni J. Jr., Pereira O., Ara W.L. Endophytic microorganisms: a review on insect control and recent advances on tropical plants // Electr. J. Biotech. 2000. V. 3. P. 40-65.
16. Новые технологии производства и применения биопрепаратов комплексного действия / Под ред. А.А. Завалина и А.П. Кожемякова. - С.-Пб.: ХИМИЗДАТ, 2010. - 64 с.
17. Шомт П.Р. Биологическая фиксация азота в однолетних агроценозах лесостепной зоны Западной Сибири/ Дисс. докт. с.-х. наук. - Барнаул, 2007. - 287 с.
18. Никитин С.Н. Оценка эффективности применения биопрепаратов в Среднем Поволжье. - Ульяновск: УлГТУ, 2014. - 135 с.

**APPLICATION POTENTIAL OF NITROGEN-FIXING AND PHYTOSTIMULATING MICROORGANISMS
FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THE AGROINDUSTRIAL COMPLEX AND IMPROVING
THE AGROECOLOGICAL SITUATION IN RUSSIAN FEDERATION**

I.A. Tikhonovich^a, A.A. Zavalin^b

***^a All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology,
pr. Lenina 82, Obninsk, Kaluga oblast, 249030 Russia***

***^b Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry,
Russian Academy of Sciences, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow, 127550 Russia***