

ОБЩЕЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ И РАСТЕНИЕВОДСТВО

УДК 633.31/37/37:636.087.8:573.6;602

DOI: 10.31367/2079-8725-2026-105-4-67-75

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ, ХРАНЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ КЛУБЕНЬКОВЫХ БАКТЕРИЙ (ОБЗОР)

Ю.В. Лактионов¹, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, laktionov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0001-6241-0273;

К.Н. Бердышева¹, аспирант лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, k.berdysheva@arriam.ru; ORCID ID: 0000-0002-5102-6310

А.И. Ковальчук¹, инженер-исследователь лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, a.kovalchuk@arriam.ru; ORCID: 0009-0005-7206-2395

С.А. Васильченко², кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории технологии возделывания зерновых и пропашных культур, wasilchenko12@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-1587-2533;

А.П. Кожемяков¹, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, kojemyakov@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-9657-2454

Ю.В. Косульников¹, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, uv.kosulnikov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0003-1134-3503;

¹ФГБНУ «Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии» (ФГБНУ ВНИИСХМ), 196608, Россия, Санкт-Петербург – г. Пушкин, ш. Подбельского 3;

²ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Научный Городок, д. 3

Настоящий обзор посвящён рассмотрению биотехнологий получения, хранения и применения препаратов клубеньковых бактерий (инокулянтов), а также актуальных вопросов внедрения препаратов симбиотической микрофлоры в отечественное сельское хозяйство в рамках формирующейся национальной биоэкономики. Рассмотрены последовательные этапы получения современных высокоэффективных препаративных форм инокулянтов, такие как выделение перспективных штаммов клубеньковых бактерий с высокими симбиотическим потенциалом и технологичностью, хранение отобранных штаммов в соответствующих микробных коллекциях, составление высокопродуктивных рецептур питательных сред и высокопроизводительных режимов глубинного культивирования в промышленных биореакторах (ферментерах), хранение инокулянтов в различной таре при различных температурных режимах, приготовление рабочих растворов биопрепаратов с пестицидными протравителями, заблаговременная обработка рабочим раствором семян перед посевом, использование различных полимерно-углеводных композиций (протекторов), защищающих бактерии от высыхания. В обзоре кратко рассмотрена эффективность современных препаративных форм инокулянтов в различных почвенно-климатических условиях, обозначены тенденции совершенствования биотехнологий препаратов клубеньковых бактерий.

Ключевые слова: Биоэкономика, сельское хозяйство, агротехнологии, биотехнологии, микробные биопрепараты, клубеньковые бактерии, инокулянты, бобовые культуры.

Для цитирования: Ю. В. Лактионов, К. Н. Бердышева, А. И. Ковальчук, С.А. Васильченко, А.П. Кожемяков, Ю. В. Косульников. Актуальные вопросы технологий получения, хранения и применения биопрепаратов на основе клубеньковых бактерий (обзор) // Зерновое хозяйство России. 2026. Т. 18, №4. С. 67–75. DOI: 10.31367/2079-8725-2026-105-4-67-75.

**CURRENT ISSUES IN THE TECHNOLOGIES OF DEVELOPING, STORING, AND USING BIOPRODUCTS BASED ON NODULE BACTERIA (REVIEW)**

Yu.V. Laktionov¹, Candidate Biological Sciences, leading researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, laktionov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0001-6241-0273;

K.N. Berdysheva¹, postgraduate of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, k.berdysheva@arriam.ru; ORCID ID: 0000-0002-5102-6310

A.I. Kovalchuk¹, research engineer of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria,

a.kovalchuk@arriam.ru; ORCID: 0009-0005-7206-2395

S.A. Vasilchenko², Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the laboratory for cultivation technology of grain and row crops, wasilchenko12@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-1587-2533;

A.P. Kozhemyakov¹, Candidate Biological Sciences, leading researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, kojemyakov@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0002-9657-2454

Yu.V. Kosulnikov¹, Candidate of Technical Sciences, researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, yv.kosulnikov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0003-1134-3503;

¹FSBSI All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology,
196600, Saint-Petersburg, Pushkin, Podbelskiy Sh., 3;

²FSBSI Agricultural Research Center "Donskoy",
347740, Russia, Rostov region, Zernograd, Nauchny Gorodok, 3; email: vniizk30@mail.ru

The current review deals with consideration of biotechnologies for developing, storing, and using nodule bacteria products (inoculants), as well as current issues of introducing symbiotic microflora products into domestic agriculture under emerging national bioeconomy. There have been considered the successive stages of developing modern highly effective forms of inoculants, such as the isolation of promising strains of nodule bacteria with high symbiotic potential and technological efficiency; storage of selected strains in appropriate microbial collections; development of highly productive formulations of nutrient media and highly productive modes of deep cultivation in industrial bioreactors (fermenters); storage of inoculants in various containers at different temperature conditions; preparation of working solutions of bioproducts with pesticide disinfectants; preliminary treatment of seeds with a working solution before sowing; the use of various polymer-carbohydrate compositions (protectors) that protect bacteria from drying out. In the review there has been estimated the effectiveness of modern inoculant formulations under various soil and climatic conditions and outlined directions in improving biotechnology for nodule bacteria products.

Keywords: Bioeconomics, agriculture, agricultural technology, biotechnology, microbial bioproducts, nodule bacteria, inoculants, legumes.

Введение. Формирование концепции биоэкономики началось на заре 21 века, представляя собой новую стратегическую модель устойчивого развития, направленную на снижение негативного влияния на окружающую среду параллельно с ростом экономической эффективности производственной деятельности. Достижение таких целей предполагалось через более разумное потребление природных ресурсов, повторное вовлечение отходов в производственный процесс (рециклинг) и внедрение биотехнологий (Гордеева, 2019).

В Российской Федерации старт развитию биоэкономической концепции был положен в 2012 году с принятием Комплексной программы развития биотехнологий на период до 2020 года. В качестве основной задачи программы ставилось создание глобально конкурентоспособного сектора биоэкономики в отечественном производстве. В рамках реализации данной программы была поставлена цель увеличить долю продукции биотехнологического сектора до 1 % ВВП к 2020 году и до 3 % – к 2030 году. Программа имела межведомственный и межотраслевой характер и охватывала развитие множества направлений в области биотехнологий и смежных отраслей. Указ Президента РФ от 7 мая 2024 года «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» определил биоэкономике одним из приоритетных направлений в обеспечении технологической независимости страны. Дополнительным шагом стало распоряжение Правительства РФ № 2103-р от 7 августа 2024 года, учредившее Научно-технологический центр биоэкономики и биотехнологий. В июле 2024 года также было учреждено Объединение по развитию микробиологической промышленности и биотехнологии с участием представителей Минпромторга, Минсельхоза, научных и производственных организаций. Одной из первоочередных задач данного

Объединения стало формирование Национального проекта «Биоэкономика».

Повышенный интерес отечественной науки и практики к биоэкономическим концепциям не выглядит удивительным, так как в настоящее время Россия испытывает критическую зависимость от импортных биотехнологий и получаемых с их помощью биопродуктов, в том числе от стран с недружественной политикой. Согласно данным заместителя министра Минпромторга М. Юрина, озвученным на Восточном экономическом форуме, объем российского рынка биоэкономики оценивается примерно в 300 млрд рублей, что составляет лишь несколько процентов от общемирового. Летом 2024 года в Правительстве РФ состоялось обсуждение проектов технологического лидерства, в ходе которого была разработана концепция национального проекта технологического лидерства (НПТЛ) «Биоэкономика». Среди проектов, представленных на стратегической сессии, выделялся блок, посвященный обеспечению продовольственной безопасности страны. Данный блок охватывал проекты в сфере селекционной генетики, производства кормовых добавок для животноводства, ветеринарных препаратов, биоудобрений и биологических средств защиты растений.

Одним из перспективных динамично-развивающихся направлений биоэкономики является производство микробиологических биопрепаратов для сельского хозяйства на основе штаммов с высокими хозяйственно-ценными признаками. Развивающиеся в данном направлении биотехнологические предприятия работают в интересах продовольственной безопасности страны, обеспечивая экологически безопасную, экономически эффективную и технологически воспроизводимую альтернативу минеральным удобрениям и химическим пестицидам. Последние достижения технологий микробиологического синтеза сделали возможным промышленное производство

микробных биопрепаратов с использованием биореакторов (ферментеров) для глубинного культивирования, которые эффективно производят микробную биомассу для удовлетворения потребностей сельхозпроизводителей в микробных инокулятах. Современные биопрепараты для растениеводства характеризуются минимальной концентрацией 1×10^8 жизнеспособных клеток на 1 мл для жидких форм или на 1 г для сухих форм, полученных с использованием наполнителей (талка, вермикулита, цеолита и тд.) (Reis et al., 2024). Особое место в этой группе занимают биопрепараты, основанные на симбиотической микрофлоре, в частности, инокулянты на основе клубеньковых бактерий. Это наиболее наукоемкие продукты, сложные в производстве, транспортировке и применении, но обеспечивающие существенные прибавки урожайности при соблюдении технологических регламентов (Кожемяков и др., 2015).

Учитывая высокий уровень прибавок урожайности, сложности, связанные с поддержанием генетической стабильности штаммов, и чувствительность к стрессовым воздействиям, вполне объяснима высокая стоимость препаратов симбиотической микрофлоры на отечественном и мировом рынках (Singh et al., 2024). На фоне устойчивого спроса со стороны сельскохозяйственного производства данная группа биопрепаратов и сопутствующий ей комплекс биотехнологий могут рассматриваться как один из ключевых драйверов биоэкономики в аграрной отрасли. Показано, что современные инокулянты могут обеспечивать более 30 % прибавки урожайности. В частности, показано, что при использовании инокулянта «Атува» (производитель ООО «Сингента») на сорте сои Пруденс урожайность сои в Тамбовской области достигает 2,52 т/га, а содержание белка повышается до 38,7 %, что обеспечивает достижение высоких показателей экономической эффективности производства сои (Афонин и др., 2023). В качестве примера можно привести еще один широко применяемый в отечественной сельскохозяйственной практике инокулянт – препарат «Хайкоут» от компании BASF, предназначенный для обработки семян сои. Примечательно, что оба препарата допускаются производителями для смешивания с пестицидными протравителями, вопреки исторически сформированной практике раздельной обработки семян инокулянтом и химическим протравителем для минимизации негативного влияния последнего на клубеньковые бактерии. В современных агротехнологиях возможность совмещения инокулянтов с пестицидами стала насущной необходимостью, ввиду широкого распространения последних среди сельхозтоваропроизводителей. Сельскохозяйственной практикой показана эффективность приема совмещения современных форм инокулянтов с ХСЗР. Примечательно, что наибольшие прибавки урожайности от применения современных микробных инокулянтов отмечаются, зачастую, в вариантах с применением химических пестицидных протравителей. Например, отмечена положительная тенденция в прибавке урожая сои по сравнению с контролем в варианте с пестицидом Стандак Топ + Гумат калия + «Хайкоут» (Пуртова, 2024).

Наряду с современными импортными препаратами, значимую роль в отечественной практике продолжает

играть инокулянт «Ризоторфин», применяемый для обработки семян бобовых культур. Первый вариант препарата был разработан в ФГБНУ «Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии» в конце прошлого века. На тот момент он отличался коротким сроком хранения (не более двух недель) и имел ряд технологических ограничений. В течение последних 10–15 лет технология производства «Ризоторфина» была существенно модернизирована, и в настоящее время его эффективность сопоставима с современными зарубежными аналогами. Результаты многочисленных полевых испытаний показывают, что применение «Ризоторфина» обеспечивает прибавку урожайности зернобобовых культур в пределах 10–40 % в зависимости от почвенно-климатических условий возделывания и отзывчивости сорта на инокуляцию. Так, при обработке «Ризоторфином» семян гороха в условиях Предуралья прибавка урожая составила 0,44 т/га по сравнению с неинокулированным контролем, а в опытах на чернозёмах Ростовской области совместная обработка «Ризоторфином» и микроудобрением позволила повысить урожайность гороха с 3,21 до 3,57 т/га. Кроме того, отмечается увеличение содержания белка в семенах на 0,5–3 % и повышение урожайности последующих культур за счет накопленного горохом почвенного азота в виде пожнивных остатков (Кожемяков и др., 2015). Инокулянт «Ризоторфин» остаётся важным элементом технологии возделывания зернобобовых культур в России и выступает примером успешного внедрения отечественных биотехнологий в сельскохозяйственную практику.

Для более широкого распространения препаратов клубеньковых бактерий среди российских сельхозтоваропроизводителей необходимо дальнейшее совершенствование биотехнологий производства инокулянтов, что позволит снизить себестоимость получения и отпускные цены, а также повысить интеграцию биопрепаратов с современными агротехнологиями, что увеличит доступность данного биотехнологического решения для отечественных производителей растениеводческой продукции. Процесс производства инокулянтов на основе клубеньковых бактерий принципиально не отличается от технологий получения препаратов других видов бактерий с хозяйственно ценными свойствами, например, PGPR (Reis et al., 2024). Данный технологический процесс можно разбить на следующие этапы:

1. Выделение и селекция микроорганизмов:

- выделение из природных источников и идентификация аборигенных штаммов по морфологическим и молекулярно-генетическим признакам;
- отбор наиболее перспективных штаммов и их селекция по целевым признакам;
- генно-инженерная модификация отобранных штаммов (при необходимости);
- патентование штаммов, их депонирование в микробиологических коллекциях.

2. Подготовка к производству:

- восстановление физиологической активности музейных штаммов;
- приготовление и стерилизация питательной среды;
- подготовка носителя (торф, цеолит, вермикулит и

др.) для сыпучих форм инокулянтов;

- проверка герметичности ферментеров и линий, работы контрольно-измерительных приборов.

3. Производственный процесс:

- приготовление посевного материала (инокулюма) в колбах с воздухопроницаемой пробкой на термостатируемых орбитальных шейкерах;

- последовательное периодическое культивирование микроорганизмов в ферментерах с возрастающим объемом при контролируемых параметрах процесса, таких как температура, интенсивность аэрации и перемешивания, уровень pH;

- получение микробной суспензии с заданным титром;

- асептический розлив культуры по таре (для жидкой формы) или ее нанесение на носитель (для сыпучей формы);

4. Хранение препарата:

- закладка тары с препаратом на хранение при соблюдении условий, прежде всего, температурных.

5. Доставка и применение:

- транспортировка к потребителю и применение препарата под СХ культуры в соответствии с инструкцией.

Специфика клубеньковых бактерий как биотехнологического объекта проявляется на этапах хранения музейных культур, промышленного культивирования и применения для обработки семян. Известно, что эффективность препаратов клубеньковых бактерий во многом зависит от генетической стабильности симбиотических штаммов, в особенности генов, отвечающих за сигналинг и формирование симбиотических структур (Румянцева и др., 2019). Наиболее надежным методом хранения бактериальных штаммов, в том числе клубеньковых бактерий, считается криоконсервация чистых культур с добавлением криопротекторов (глицерин, сахароза и тд.) при температурах ниже -70°C , которая позволяет практически полностью остановить метаболизм клеток, обеспечивая долгосрочное поддержание их жизнеспособности и сохранение генетической стабильности. Метод криохранения широко распространен как в отечественной, так и в зарубежной сельскохозяйственной микробиологии и рекомендован, например, OECD для использования в биологических ресурсных центрах. В отечественной сельскохозяйственной микробиологии большое внимание уделяется формированию обширных коллекций микроорганизмов с хозяйственно-ценными свойствами, крупнейшими центрами хранения и изучения сельскохозяйственных микроорганизмов являются институты бывшей Россельхозакадемии, обладающие микробным фондом объемом порядка 20 тыс. культур. В 2010 году Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии учредил Ведомственную коллекцию полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения (ВКСМ). Для долгосрочного криоконсервирования культур применяется специализированная автоматизированная станция Liconic Instruments, поддерживающая температуру -80°C . Ключевыми достоинствами этого хранилища являются высококачественная и стабильная консервация микробиологического материала, а также система авторизованного доступа к коммерческим

штаммам, управляемая компьютерными ключами. Кроме того, создана общедоступная онлайн-база данных генетических ресурсов сельскохозяйственных микроорганизмов РФ, предоставляющая информацию в режиме реального времени.

Криохранилища позволяют сохранять генетику перспективных штаммов, но стоит помнить, что потеря симбиотических функций возможна в результате производственного процесса, т.е. культивирования в ферментерах. Это достаточно актуальная проблема для клубеньковых бактерий, продолжительно выращиваемых в биореакторах без растения-хозяина. При промышленном производстве также стоит учитывать относительно медленные скорости роста клубеньковых бактерий, особенно для так называемых 'медленнорастущих' штаммов (напр. рода *Bradyrhizobium*), что обуславливает необходимость продолжительного культивирования и поддержания на заданном уровне биотехнологических параметров и микробиологической чистоты выращиваемой микробной культуры. Особенности клубеньковых бактерий на этапе применения инокулянтов выражаются в чувствительности данных микроорганизмов к различным стресс-факторам, таким как контакт с химическими пестицидными протравителями и высушивание на обработанных семенах, чем обусловлена необходимость соблюдения методик эффективного совмещения инокулянтов с ХСЗР (Косульников и др., 2018) и применения, защищающих бактерии полимерно-углеводных композиций (Лактионов и др., 2019). Примечательно, что в зарубежной науке проблеме повышения устойчивости клубеньковых бактерий к стресс-факторам уделяется повышенное внимание, более того, перспективные штаммы с высокими хозяйственно-ценными свойствами подвергаются генетической трансформации с целью повысить их устойчивость к стресс-факторам, обусловленным как почвенно-климатическими, так и антропогенными условиями. Хотя в нескольких исследованиях были выявлены ризобийные гены, обеспечивающие адаптацию к различным условиям окружающей среды, генетическая основа устойчивости ризобий к стрессу остается малоизученной. В частности, в работе Zhang et al. (2024) подчеркивается важность повышения выживаемости ризобий в почве, что может увеличить урожайность сельскохозяйственных культур и способствовать формированию устойчивых бобово-ризобийных симбиозов в разных агроклиматических условиях. Научным коллективом были сопоставлены современные знания о генетической структуре и метаболических путях клубеньковых бактерий, связанных со стрессоустойчивостью и произведен обзор новейших подходов геномной инженерии, такие как синтетическая биология, применяемых для улучшения приспособляемости ризобий к изменяющимся условиям окружающей среды (Zhang et al., 2024). Можно заключить, что эффективность биопрепаратов симбиотической микрофлоры в сельскохозяйственном производстве лимитируется как совершенством биотехнологических процессов, так и биологическими особенностями штаммов, а также уровнем проработанности методов хранения и применения препаратов на их основе.

Особенно остро стоит вопрос эффективного внедрения биотехнологических решений в реальное

сельскохозяйственное производство. В частности, на отечественном рынке наблюдается дефицит эффективных, но при этом недорогих, удобных в хранении и применении форм биопрепаратов (инокулянтов). Инокулянты могут быть жидкими (суспензия), твёрдыми (порошок, гранулы) или пастообразными. Стоит помнить, что критически важным требованием для современного агропромышленного комплекса является возможность механизированного внесения препарата, например, путем опрыскивания семян через форсунки протравочных машин. Это требование применимо исключительно к жидким формам, не содержащим крупных нерастворимых включений. Жидкие препаративные формы также обеспечивают более высокую выживаемость клеток и могут выдерживать более интенсивное воздействие стресс-факторов, таких как перепады температур (Reis et al., 2024). Многие современные исследования посвящены сравнению эффективности и технологичности жидких и сухих (преимущественно торфяных) инокулянтов. Например, Gatabazi et al. (2021) продемонстрировали, что инокуляция сои препаратом *Bradyrhizobium japonicum* WB74 (как в жидкой, так и в торфяной форме) положительно влияла на общую урожайность и содержание протеина в Южной Африке. В зоне А лучшие результаты показал жидкий состав (1,79 т/га против 1,75 т/га у торфа), тогда как в зоне В торфяные составы превосходили жидкие (1,75 т/га против 1,71 т/га). Таким образом, эффективность обоих типов инокулянтов на основе одного штамма была сопоставима. Однако в условиях высокопроизводительного промышленного земледелия доминирует механизированный метод обработки семян (опрыскивание), требующий препаратов,

свободно проходящих через фильтры и форсунки. Торфяные инокулянты остаются применимыми для ручного опудривания малых партий семян, включая мелкосеменные травы. Кроме того, жидкие формуляции инокулянтов можно модифицировать технологическими добавками, такими как водорастворимые полимеры или неионогенные ПАВы. Подобные компоненты улучшают адгезионные свойства биопрепаратов в отношении семенной поверхности и защищают бактерии от высыхания в период от обработки семян до их заделки в почву, который в производственных условиях может продолжаться несколько недель (Лактионов и др., 2019).

Общую схему производства и применения жидких инокулянтов можно разбить на два ключевых этапа (рис. 1):

Этап 1. Получение жидкой формы биопрепарата:

1. Растворение компонентов полусинтетической питательной среды (напр. на основе маннита и дрожжевого экстракта) в водопроводной воде.

2. Стерилизация питательной среды острым паром в течение 1 часа и охлаждение до 28–29 °С.

3. Посев культуры в объеме 5–10 % от объема среды.

4. Культивирование при:

- температуре 28–30 °С,
- интенсивности аэрации 0,8-1,0 м³/м³ в минуту,
- частоте перемешивания 150–200 об./мин,
- pH 6,5–7,5;
- длительность: 3–4 суток (для быстрорастущих) и 5–6 суток (для медленнорастущих штаммов).

5. Розлив по стерильной таре (химически стерилизованные пластиковые канистры или гамма-стерильные пленочные пакеты) и закладка на хранение



Рис. 1. Общая технологическая схема получения и применения инокулянтов на основе клубеньковых бактерий
Fig. 1. General technological scheme for the production and use of inoculants based on nodule bacteria

В качестве дополнительного технологического этапа при получении жидкой формы возможна сепарация клеток на промышленной центрифуге и их последующее ресуспендирование до заданной концентрации микроорганизмов с целью повышения титра и снижения логистических издержек хранения и транспортировки продукта. При хранении и транспортировке продукта, важно не допускать замораживания инокулянта, так как в циклах замораживания/оттаивания число жизнеспособных клеток может сокращаться более чем вдвое. При необходимости транспортировки при отрицательных температурах необходимо использовать теплоизоляционные материалы.

Этап 2. Применение инокулянта:

1. Разведение инокулянта в нехлорированной воде по инструкции в соответствии с нормой расхода.

2. Приготовление рабочего раствора с опциональным добавлением ХСЗР, адъювантов, красителей. При этом данные компоненты должны быть совместимы с клубеньковыми бактериями, т.е. малотоксичными для них.

3. Обработка семян вручную или с использованием протравочной машины.

4. Посев не позднее 24 часов после обработки (при отсутствии в составе препарата или добавляемого отдельно протектора, обеспечивающего защиту бактерий на семенах от высыхания).

5. Контроль эффективности инокуляции в фазе бутонизации (число и масса клубеньков, цвет в разрезе).

Исследования показали, что использование натуральных питательных сред, таких как бобовые отвары, для хранения инокулянтов ризобий не обеспечивает стабильно высокого содержания бактерий. Хотя титр клубеньковых бактерий на бобовом отваре к концу культивирования достигает относительно высоких показателей (3,1–4,5 млрд КОЕ/мл), уже через два месяца хранения жизнеспособность клеток снижается почти вдвое (до 1,7–2,3 млрд КОЕ/мл). Через три месяца этот показатель падает до 3,1–6,1 млн КОЕ/мл. Кроме того, нарушение асептических условий при производстве на натуральных средах приводит к активному росту посторонней микрофлоры, что негативно сказывается на качестве препарата. Температура хранения также оказывает существенное влияние: повышение температуры с 4–6 °C до 18–21 °C вызывает снижение численности жизнеспособных клеток почти на порядок в течение 8 недель хранения (Кожемяков и др., 2015).

В противоположность этому, полусинтетические и полностью синтетические питательные среды оказываются более технологичными для производства инокулянтов. Их состав базируется на химически чистых источниках углерода, азота и минеральных элементов, а также включает концентрированные органические добавки, такие как пептон и дрожжевой экстракт, в качестве сложных факторов роста. Стандартизированный состав таких сред устраняет зависимость качества инокулянта от вариативности натурального сырья. Синтетические среды, разработанные с учетом специфических потребностей клубеньковых бактерий, не только поддерживают высокий титр микроорганизмов, но и значительно продлевают срок годности препаратов. Например, применение специализированной

синтетической среды позволяет получить инокулянт с титром 3,6–4,2 млрд КОЕ/мл, при этом численность жизнеспособных клеток снижается не более чем до 2,7–2,8 млрд КОЕ/мл за шесть месяцев хранения (Кожемяков и др., 2015). В рамках исследования Elsakhawu с соавторами (2021) были протестированы дрожжевые сахарозные среды, модифицированные добавлением поливинилпирролидона (ПВП) или гуммиарабика в качестве коллоидных агентов. К ним также добавляли эктоин и/или глицерин. Эксперименты проводились при комнатной температуре (25 °C) на протяжении 12 месяцев хранения жидких культур клубеньковых бактерий. Результаты показали, что включение ПВП и эктоина в жидкую форму биоинокулянта на основе ризобий не только способствовало повышению выживаемости клеток, но и улучшило адгезионные свойства культуры. Это, в свою очередь, положительно сказалось на качестве обработки семян данным препаратом (Elsakhawu et al., 2021).

В последнее время наблюдается рост числа исследований, направленных не только на констатацию ограниченной устойчивости клубеньковых бактерий к пестицидам и высушиванию, но и на разработку более резистентных штаммов ризобий. Эти усилия предпринимаются как с использованием методов генетической инженерии, так и классической селекции. Так, в исследовании Santoyo-Pizano et al. (2021) были выделены штаммы клубеньковых бактерий фасоли *R. phaseoli* и оценена их устойчивость к диазинону. Для этого *R. phaseoli* культивировали в присутствии диазинона с целью отбора наиболее резистентных форм, которые затем использовались для инокуляции фасоли. Через 45 суток после инокуляции оценивались по количеству клубеньков на корнях, сырой и сухой биомассе, морфометрическим показателям растений. Выявлено, что штамм *R. phaseoli*, устойчивый к диазинону, сохранил симбиотическую активность в отношении *P. vulgaris*. Авторы пришли к выводу о перспективности использования данного штамма для разработки инокулянтов, совместимых с инсектицидами на основе диазинона (Santoyo-Pizano et al., 2021).

Активно развиваются исследования по оценке совместимости препаратов клубеньковых бактерий не только с химическими, но и биологическими средствами защиты растений. Данные исследования проводятся, по большей части, в рамках создания микробных консорциумов, составленных на основе микроорганизмов с взаимодополняющими свойствами. В природе почвенные микроорганизмы часто функционируют в сообществах, где их совместное взаимодействие может оказывать положительное влияние на растения. Микробный консорциум определяется как совокупность двух или более микроорганизмов, совместно обитающих. Идею микробного консорциума впервые выдвинул Йоханнес Райнке в 1872 году. Современные научные изыскания фокусируются на роли микробных консорциумов в повышении урожайности растений, их защите от патогенов. Кроме того, предлагаются подходы к созданию полифункциональных консорциумов, сочетающих не только защитные свойства (от болезней и вредителей), но и ростостимулирующую активность в отношении растений (Yadav et al., 2021).

В состав таких консорциумов могут входить:

- Азотфиксаторы (ризобии, ассоциативные азотфиксаторы);
- Стимулирующие рост микроорганизмы, фосфат- и калиймобилизаторы (PGPR – *Pseudomonas*, *Bacillus* и др.);
- Антагонисты фитопатогенов (*Bacillus*, *Trichoderma*);
- Энтомопатогены (*Beauveria bassiana*, *Bacillus thuringiensis*).

В странах, активно использующих биопрепараты, таких как Индия, существуют проработанные критерии качества микробных консорциумов. Например, для препаратов, содержащих штаммы *Rhizobium* и *Azotobacter* или *Azospirillum*, минимальная концентрация этих организмов должна составлять от 1×10^7 КОЕ/г до 1×10^8 КОЕ/мл соответственно (Reis et al., 2024).

Показано, что правильно подобранные комбинации штаммов *Rhizobium* и PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) способны работать синергетически, усиливая положительное воздействие на растения. Клубеньковые бактерии отвечают за фиксацию атмосферного азота, в то время как PGPR (например, *Pseudomonas*, *Bacillus*) способствуют растворению фосфатов, улучшая питание растений. Отдельные PGPR (например, *Azospirillum*) также стимулируют образование клубеньков, продуцируя фитогормоны. Однако, возможны и нежелательные взаимодействия: некоторые штаммы PGPR могут конкурировать с ризобиями за место колонизации корней, а в отдельных случаях даже подавлять экспрессию подгенов, отвечающих за формирование клубеньков. Оптимальным подходом к решению этой проблемы является раздельное внесение: инокулянты применяют непосредственно при посеве, а PGPR применяют на ранних стадиях развития растения, например, посредством внесения с капельным поливом или при опрыскивании. Однако для многих полевых бобовых культур раздельное внесение препаратов ризосферной микрофлоры не представляется экономически целесообразным.

Отдельного внимания заслуживает сочетание

инокулянтов с биофунгицидами. Некоторые грибные препараты (например, *Trichoderma harzianum*) способны угнетать клубеньковые бактерии, снижая азотфиксацию на 30% и более. Таким образом, грамотное комбинирование биопрепаратов позволяет существенно повысить их эффективность, формируя устойчивые системы биологической защиты и стимуляции роста растений (Belimov et al., 2020).

Выводы. Проведен обзор актуальных вопросов технологий получения, хранения и применения препаратов клубеньковых бактерий в контексте биоэкономики. Показана важность отбора штаммом не только по величине симбиотического потенциала и азотфиксирующей активности, но технологическим свойствам, таким как устойчивость к пестицидным протравителям и высушиванию на инокулированных семенах. Раскрыт ряд актуальных направлений исследований по повышению эффективности инокулянтов в рамках распространенных в практике агротехнологий, в частности, таких как селекция штаммов на повышенную устойчивость к действующим веществам ХСЗР и разработка жидких форм инокулянтов с высоким титром, пригодных для механизированного внесения через форсунки опрыскивателей. Приведен ряд технологических приемов, позволяющих снизить себестоимость получения инокулянтов (посредством подбора более оптимальных по составу рецептур питательных сред и производительных режимов культивирования) и повысить сроки их хранения в более широких интервалах температур. В свете всего вышесказанного можно заключить, что последние инновации в области технологий микробного синтеза для получения ризобийных инокулянтов открывают для отечественной сельскохозяйственной культуры более широкого внедрения препаратов клубеньковых бактерий в свои агротехнологии, что позволит получать более высокие урожаи бобовых культур с повышенным содержанием растительного белка.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФ 25-26-00242.

Библиографический список

1. Афонин Н. М., Жегульская А. В. Оценка эффективности инокулянтов семян сои // Наука и образование. 2023. Т. 6. № 1.
2. Гордеева И.В. Биоэкономика как одно из стратегических направлений устойчивого развития // Научное обозрение. Экономические науки. 2019. № 1. С. 16–21.
3. Косульников Ю. В., Лактионов Ю. В. О факторах, влияющих на токсичность протравителей семян для симбиотических азотфиксаторов в составе биопрепаратов // Сельскохозяйственная биология. 2018. № 5. С. 1037–1044. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.5.1037rus
4. Кожемяков А. П., Лактионов Ю. В., Попова Т. А., Орлова А. Г., Кокорина А. Л., Вайшля О. Б., Агафонов Е. В., Гужвин С. А., Чураков А. А., Яковлева М. Т. Агротехнологические основы создания усовершенствованных форм микробных биопрепаратов для земледелия // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50, №3. С. 369–376. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.3.369rus
5. Лактионов Ю. В., Косульников Ю. В., Дудникова Д. В., Яхно В. В., Кожемяков А. П. Протекторные свойства водорастворимых полимерных композиций и их твердофазной модификации при предпосевной обработке инокулированных семян сои *Glycine Max* (L.) Merr // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54, №5. С. 1052–1059. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.1052rus
6. Пуртова Л. Н., Киселева И. В., Кочева Н. С., Русакова Д. А., Емельянов А. Н. Влияние комплексной предпосевной обработки семян сои в Приморском крае на урожайность, микрофлору почв и процессы гумусоаккумуляции // Вестник ДВО РАН. 2024. № 2(234). С. 159–169. DOI: 10.31857/S0869769824020149
7. Румянцева М. Л. Клубеньковые бактерии: перспективы мониторинга симбиотических свойств и стрессоустойчивости с использованием генетических маркеров // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54, № 5. С. 847–862. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.847rus
8. Belimov A.A., Shaposhnikov A.I., Azarova T.S., Makarova N.M., Safronova V.I., Litvinskiy V.A., Nosikov V.V., Zavalin A.A., Tikhonovich I.A. Microbial Consortium of PGPR, Rhizobia and Arbuscular Mycorrhizal Fungus Makes Pea Mutant

SGECdt Comparable with Indian Mustard in Cadmium Tolerance and Accumulation // *Plants*. 2020. № 9 (8). Article number: 975. DOI: 10.3390/plants9080975

9. Elsakhawy T., Ghazi A., Abdel-Rahman M. A. Developing Liquid Rhizobium Inoculants with Enhanced Long-Term Survival, Storage Stability, and Plant Growth Promotion Using Ectoine Additive // *Current microbiology*. 2021. V. 78, №1. P. 282–291. DOI: 10.1007/s00284-020-02265-z

10. Gatabazi A., Vorster B. J., Mvondo-She M. A., Mangwende E., Mangani R., Hassen A. I. Efficacy of peat and liquid inoculant formulations of *Bradyrhizobium japonicum* strain WB74 on growth, yield and nitrogen concentration of soybean (*Glycine max* L.) // *Nitrogen*. 2021. №2(3). P. 332–346. DOI: 10.3390/nitrogen2030023

11. Reis G. A. dos, Martínez-Burgos W. J., Pozzan R., Puche Y. P., Ocán-TorresD., Mota P. de Q. F., Rodrigues C., Serra J. L., Scapini T., Karp S. G., Socol C. R. Comprehensive Review of Microbial Inoculants: Agricultural Applications, Technology Trends in Patents, and Regulatory Frameworks // *Sustainability*. 2024. V. 16, №19. P. 8720. DOI: 10.3390/su16198720

12. Santoyo-Pizano G., Hernández-Mendoza J. L., Márquez-Benavides L., De Luna-Esquivel G., Sánchez-Yáñez J. M. Rhizobium phaseoli tolerant to insecticide on the growth of Phaseolus vulgaris // *Journal of the Selva Andina Research Society*. 2021. V. 12, №1. P. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2021.120100030x>

13. Singh V., Kumar B. A review of agricultural microbial inoculants and their carriers in bioformulation // *Rhizosphere*. 2024. № 29. Article number: 100843. DOI: 10.1016/j.rhisph.2023.100843

14. Yadav S. K., Patel J. S., Singh B. N., Bajpai R., Teli B., Rajawat M. V., Sarma B. Biofertilizers as Microbial Consortium for Sustainability in Agriculture // *Plant, Soil and Microbes in Tropical Ecosystems*. 2021. P. 349–368. DOI: 10.1007/978-981-16-3364-5_16

15. Zhang Y., Ku Y. S., Cheung T. Y., Cheng S. S., Xin D., Gombeau K., Cai Y., Lam H. M., Chan T. F. Challenges to rhizobial adaptability in a changing climate: Genetic engineering solutions for stress tolerance // *Microbiological Research*. 2024. № 288. Article number: 127886. DOI: 10.1016/j.micres.2024.127886

References

1. Afonin N. M., ZHegul'skaya A. V. Ocenka effektivnosti inokulyantov semyan soi [Estimation of the efficiency of soybean seed inoculants] // *Nauka i obrazovanie*. 2023. T 6. № 1.

2. Gordeeva I.V. Bioekonomika kak odno iz strategicheskikh napravlenij ustojchivogo razvitiya [Bioeconomics as a strategic direction for sustainable development] // *Nauchnoe obozrenie. Ekonomicheskie nauki*. 2019. № 1. S. 16–21.

3. Kosul'nikov YU. V., Laktionov YU. V. O faktorah, vliyayushchih na toksichnost' protravitelej semyan dlya simbioticheskikh azotifiksatorov v sostave biopreparatov [Factors affecting the toxicity of seed disinfectants for symbiotic nitrogen-fixers in bioproducts] // *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. 2018. №5. S.1037–1044. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.5.1037rus

4. Kozhemyakov A. P., Laktionov YU. V., Popova T. A., Orlova A. G., Kokorina A. L., Vajshlya O. B., Agafonov E. V., Guzhvin S. A., CHurakov A. A., YAKovleva M. T. Agrotekhnologicheskie osnovy sozdaniya usovershenstvovannyh form mikrobnnyh biopreparatov dlya zemledeliya [Agrotechnological foundations for the development of improved forms of microbial bioproducts for agriculture] // *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. 2015. T. 50, №3. S. 369–376. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.3.369rus

5. Laktionov YU. V., Kosul'nikov YU. V., Dudnikova D. V., YAhno V. V., Kozhemyakov A. P. Protektornye svoystva vodorastvorimyyh polimernyyh kompozitsiy i ih tverdogaznoj modifikatsii pri predposevnoy obrabotke inokulirovannyh semyan soi *Glycine Max* (L.) Merr [Protective properties of water-soluble polymer compositions and their solid-phase modification in pre-sowing treatment of inoculated soybean seeds with *Glycine Max* (L.) Merr] // *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. 2019. T. 54, №5. S. 1052–1059. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.1052rus

6. Purtova L. N., Kiseleva I. V., Kocheva N. S., Rusakova D. A., Emel'yanov A. N. Vliyanie kompleksnoy predposevnoy obrabotki semyan soi v Primorskom krae na urozhajnost', mikrofloru pochv i processy gumusonakopleniya [The effect of complex pre-sowing treatment of soybean seeds in the Primorsky Territory on productivity, soil microflora, and humus accumulation] // *Vestnik DVO RAN*. 2024. № 2(234). S. 159–169. DOI: 10.31857/S0869769824020149

7. Rumyantseva M. L. Kluben'kovye bakterii: perspektivy monitoringa simbioticheskikh svoystv i stressoustojchivosti s ispol'zovaniem geneticheskikh markerov [Nodule bacteria: prospects for monitoring symbiotic properties and stress resistance using genetic markers] // *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. 2019. T. 54, № 5. S. 847–862. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.847rus

8. Belimov A.A., Shaposhnikov A.I., Azarova T.S., Makarova N.M., Safronova V.I., Litvinskiy V.A., Nosikov V.V., Zavalin A.A., Tikhonovich I.A. Microbial Consortium of PGPR, Rhizobia and Arbuscular Mycorrhizal Fungus Makes Pea Mutant SGECdt Comparable with Indian Mustard in Cadmium Tolerance and Accumulation // *Plants*. 2020. № 9 (8). Article number: 975. DOI: 10.3390/plants9080975

9. Elsakhawy T., Ghazi A., Abdel-Rahman M. A. Developing Liquid Rhizobium Inoculants with Enhanced Long-Term Survival, Storage Stability, and Plant Growth Promotion Using Ectoine Additive // *Current microbiology*. 2021. V. 78, №1. P. 282–291. DOI: 10.1007/s00284-020-02265-z

10. Gatabazi A., Vorster B. J., Mvondo-She M. A., Mangwende E., Mangani R., Hassen A. I. Efficacy of peat and liquid inoculant formulations of *Bradyrhizobium japonicum* strain WB74 on growth, yield and nitrogen concentration of soybean (*Glycine max* L.) // *Nitrogen*. 2021. №2(3). P. 332–346. DOI: 10.3390/nitrogen2030023

11. Reis G. A. dos, Martínez-Burgos W. J., Pozzan R., Puche Y. P., Ocán-TorresD., Mota P. de Q. F., Rodrigues C., Serra J. L., Scapini T., Karp S. G., Socol C. R. Comprehensive Review of Microbial Inoculants: Agricultural Applications, Technology Trends in Patents, and Regulatory Frameworks // *Sustainability*. 2024. V. 16, №19. P. 8720. DOI: 10.3390/su16198720

12. Santoyo-Pizano G., Hernández-Mendoza J. L., Márquez-Benavides L., De Luna-Esquivel G., Sánchez-Yáñez J. M. Rhizobium phaseoli tolerant to insecticide on the growth of Phaseolus vulgaris // Journal of the Selva Andina Research Society. 2021. V. 12, №1. P. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2021.120100030x>
13. Singh V., Kumar B. A review of agricultural microbial inoculants and their carriers in bioformulation // Rhizosphere. 2024. № 29. Article number: 100843. DOI: 10.1016/j.rhisph.2023.100843
14. Yadav S. K., Patel J. S., Singh B. N., Bajpai R., Teli B., Rajawat M. V., Sarma B. Biofertilizers as Microbial Consortium for Sustainability in Agriculture // Plant, Soil and Microbes in Tropical Ecosystems. 2021. P. 349–368. DOI: 10.1007/978-981-16-3364-5_16
15. Zhang Y., Ku Y. S., Cheung T. Y., Cheng S. S., Xin D., Gombeau K., Cai Y., Lam H. M., Chan T. F. Challenges to rhizobial adaptability in a changing climate: Genetic engineering solutions for stress tolerance // Microbiological Research. 2024. № 288. Article number: 127886. DOI: 10.1016/j.micres.2024.127886

Поступил: 01.10.25; доработана после рецензирования: 24.11.25; принята к публикации: 27.11.25.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несутравную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Лактионов Ю. В. – научное руководство, концептуализация исследования, написание текста статьи; Бердышева К. Н. – анализ литературных источников; Ковальчук А. И. – анализ литературных источников; Васильченко С. А. – анализ литературных источников; Кожемяков А. П. – анализ литературных источников; Косильников Ю. В. – сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.