

жений. Анализ материалов о нормативно-методической деятельности Ростехнадзора, МЧС, НССО, Минсельхоза России за 2020–2022 гг. в области безопасности гидротехнических сооружений: отчет о НИР / В.В. Каштанов, С.С. Турапин, С.С. Савушкин [и др.]; М.: М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, 2023. 124 с. № гос. регистрации 224020200891-6.

REFERENCES

1. On the safety of hydraulic structures: Federal Law № 117-FZ: [adopted by the State Duma on June 23, 1997]. Moscow: Centrmag, 2025. 32 p. ISBN 978-5-903086-75-7.
2. The organization's standard with 34.21.307–2005. Safety of hydraulic structures. Basic concepts. Terms and definitions: approved by «Hydrogenation» RAO «EAC of Russia» dated 02.02.2005; date of the first inspection 2009. St. Petersburg: VNIIG named after B.E. Vedenev, 2005. 20 p.
3. Bulgakov D.V., Grzybowski S.A. The field of safety of hydraulic structures, fixed in the normative legal acts of the Russian Federation // Ecology and Construction. 2024. № 1. Pp. 9–16. DOI 10.35688/2413-8452-2024-01-002.
4. Decree of the Government of the Russian Federation № 253 dated April 28, 2007. «On the procedure for maintaining the State Water Register». URL: <http://government.ru/docs/all/59700/> (date of access: 08/22/2025).
5. Decree of the Government of the Russian Federation № 219 dated April 10, 2007 «On Approval of the Regulations on the Implementation of State Monitoring of Water bodies». URL: <http://government.ru/docs/all/59503/> (date of access: 08/22/2025).
6. Decree of the Government of the Russian Federation № 1893 dated November 20, 2020 «On Approval of the Rules for the Formation and Maintenance of the Russian Register of Hydraulic Structures». URL: <http://government.ru/docs/all/59503/> (date of access: 08/22/2025).
7. Abramenko I.P. Regulatory and legal aspects of accounting for land reclamation systems // Bulletin of Meliorative Science. 2024. № 3. Pp. 24–30.
8. On new regulatory legal acts on the operation and supervision of GTS // Gidrotehnika. 2021. № 1(62). Pp. 71–73.
9. Abramenko I.P. Actual issues of improving the computational and analytical tools for accounting for land reclamation facilities // Ways to increase the efficiency of irrigated agriculture. 2023. № 3(91). Pp. 26–35.
10. Yurchenko I.F. Innovative development of land reclamation based on digitalization and creation of technological platforms // Moscow Economic Journal. 2021. № 6. Pp. 36–52. DOI 10.24411/2413-046X-2021-10333.
11. Savina T.N. Digital economy as a new development paradigm: challenges, opportunities and prospects // Finance and Credit. 2018. Vol. 24, № 3(771). Pp. 579–590. DOI 10.24891/fc.24.3.579.
12. Decree of the Government of the Russian Federation № 731 dated May 14, 2021 «On the State Program for the effective involvement in the turnover of agricultural land and the development of the land reclamation complex of the Russian Federation». URL: <http://government.ru/docs/all/134619/> (date of access: 08/22/2025).
13. Code of rules of JV 58.13330.2019 «SNiP 33-01–2003. Hydraulic structures. Main provisions»: official publication: approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated 12/16/19: effective from 06/17/20. Moscow: Standartinform, 2020. 39 p.
14. Savushkin S.S., Grzhibovsky S.A. On the issue of the operation of hydraulic structures of the meliorative complex // Ecology and construction. 2021. № 2. Pp. 22–28. DOI 10.356888/2413-8452-2021-02-002.
15. Kashtanov V.V., Medvedeva A.A. Improvement of the regulatory framework in the field of safety of hydraulic structures // Land reclamation and water management. 2024. № 5. Pp. 2–6. DOI 10.32962/0235-2524-2024-5-2-6.
16. Federal State Budgetary Institution «Registration and Cadastre Center»: official website. URL: <http://waterinfo.ru/gts/search.php/> (date of access: 08/22/2025).
17. Bulgakov D.V. Summary of the analysis and proposals of the existing regulatory framework in the field of GTS safety // Bulletin of Meliorative Science. 2024. № 2. Pp. 52–55.
18. Kashtanov V.V., Medvedeva A.A. Legal features of registration of hydraulic structures // Bulletin of Meliorative Science. 2024. № 3. Pp. 168–175.
19. Scientific and analytical review of the existing regulatory framework in the field of safety of hydraulic structures. Analysis of materials on the regulatory and methodological activities of Rostekhnadzor, the Ministry of Emergency Situations, the NSSO, the Ministry of Agriculture of Russia for 2020–2022 in the field of safety of hydraulic structures: a research report / V.V. Kashtanov, S.S. Turapin, S.S. Savushkin [et al.]; Ministry of Agriculture of the Russian Federation. Federation. 2023. 124 p. State registration number 224020200891-6.

Турапин Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, врио директора, rgaduga@yandex.ru; **Медведева Анна Александровна**, мл. науч. сотрудник, maa.vniiraduga@yandex.ru (ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Россия, Московская обл., п. Радужный).

УДК 504.53.06:631.6.02

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-5-6-13

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАЗОТРОФОВ И БИОПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЦЕНОЗОВ

Е.Б. СТРЕЛЬБИЦКАЯ

Ключевые слова: биологическая азотфиксация, diazotroфы, биопрепараты на основе азотфиксирующих микроорганизмов, инокуляция.

Keywords: biological nitrogen fixation, diazotrophs, biologics based on nitrogen-fixing microorganisms, inoculation.

Аннотация. В статье рассматриваются практические аспекты использования азотфиксирующих микроорганизмов и препаратов на их основе с целью дополнения к фундаментальным знаниям о характере действия азотфиксации на обогащение биологическим азотом почвы и агроценозов, а также разработки агротехнических приемов для повышения плодородия почв и формирования урожайности сельскохозяйственных культур в различных природно-климатических условиях. Представлена функциональная схема основных принципиальных подходов для использования способности микроорганизмов к азотфиксации.

Проанализированы имеющиеся данные о факторах, воздействующих на повышение азотфиксирующей способности diazotрофов, и механизмах взаимоотношений в растительно-микробной системе различных агроценозов. Рассмотрены результаты применения и проведена оценка эффективности препаратов на основе активных штаммом азотфиксирующих микроорганизмов на активизацию процесса азотфиксации в агроценозах, повышение продуктивности сельскохозяйственных культур. Приведены перечни биопрепаратов на основе микроорганизмов, рекомендуемые для применения в растениеводстве для активизации биологической фиксации азота с целью улучшения обеспеченности сельскохозяйственных растений азотом.

Abstract. The article discusses practical aspects of the use of nitrogen-fixing microorganisms and preparations based on them in order to supplement the fundamental knowledge about the nature of the effect of nitrogen fixation

on the enrichment of biological nitrogen in soil and agrocenoses, as well as the development of agrotechnical techniques to increase soil fertility and crop yields in various climatic conditions. The functional scheme of the main principal approaches for using the ability of microorganisms to nitrogen fixation is presented. The available data on the factors influencing the increase in the nitrogen-fixing ability of diazotrophs and the mechanisms of interrelationships in the plant-microbial system of various agrocenoses are analyzed. The results of the application are considered and the effectiveness of preparations based on active strains of nitrogen-fixing microorganisms for activating the nitrogen fixation process in agrocenoses and increasing crop productivity is evaluated. The lists of biologics based on microorganisms recommended for use in crop production to activate biological nitrogen fixation in order to improve nitrogen supply to agricultural plants are given.

Введение. В решении проблемы повышения продуктивности сельскохозяйственных культур ведущая роль принадлежит биологическим факторам, и главным образом, фиксации атмосферного азота почвенными diaзотрофами. Анализ научных публикаций свидетельствует о возросшем интересе в последние 2...3 десятилетия к вопросам биологической азотфиксации и практического использования азотфиксирующих микроорганизмов и препаратов на их основе. Это связано не только с определяющей ролью этого процесса в азотном балансе биосферы, но и возможностью сокращения объемов применения минерального азота в технологиях выращивания полевых культур в свете современных тенденций биологизации земледелия при одновременном снижении энергетических затрат на производство продукции растениеводства [1].

Учитывая уникальность биохимических и физико-химических процессов фиксации азота микроорганизмами, значение биологической фиксации в круговороте азота (известно, что до 70...90% азота в пахотных почвах фиксируется из атмосферного воздуха симбиотическими, ассоциативными и свободноживущими микроорганизмами [2]), внимание специалистов в настоящее время сфокусировано на всестороннем и глубоком исследовании этого явления, а также механизмов взаимоотношения растений и азотфиксирующих микроорганизмов. На данный момент отмечен дефицит научных данных о процессе азотфиксации и количественной оценке его активности в агроэкосистемах, не до конца установлена роль микроорганизмов-азотфиксаторов в азотном балансе почв. В связи с этим, анализ и систематизация имеющихся научных и экспериментальных исследований по этим вопросам, включая оценку воздействия применения биопрепаратов на степень ассоциативной азотфиксации в ризосфере, рост и развитие растений, является как дополнением к фундаментальным знаниям о характере действия азотфиксации на обогащение биологическим азотом почвы и агроценозов, так и существенным шагом для разработки агротехнических приемов для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур в различных природно-климатических условиях.

Материалы и методы. Основным компонентом методической базы настоящей статьи явился принципиально новый научный подход к обоснованию мелиорации и рекультивации земель на основе современных представлений и возобновления интереса к вопросу исследования механизмов взаимоотношения растений и азотфиксирующих микроорганизмов. Особое вни-

мание уделено исследованию практических аспектов использования diaзотрофов и препаратов на их основе, а также микробно-растительных азотфиксирующих сообществ с целью повышения продуктивности азотфиксации в растениеводстве и в целом продуктивности агроэкосистем. Для определения и формулирования основных аспектов взаимодействия ассоциативных diaзотрофов с сельскохозяйственными растениями при осуществлении мелиоративной деятельности применены информационно-аналитические методы исследования, которые включали комплексный анализ, структуризацию теоретической и научно-технической информации по вопросам недооцененной до последнего времени роли азотфиксации микроорганизмами азота и снабжения им сельскохозяйственных культур в процессе их взаимодействия. Эти методы исследования базировались на методологии системных и всесторонних научных исследований в области мелиорации, биологии, экологии и смежных областях науки, касающихся изучения и моделирования весьма значимых аспектов жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, как биологическая фиксация азота и взаимоотношения с высшими растениями.

Результаты и обсуждение. В последние годы в связи с возникновением проблемы экологизации сельскохозяйственного производства наступил период переосмысления методов и стратегии использования биологических и химических источников азотного питания сельскохозяйственных растений [3], поиска новых микробно-растительных азотфиксирующих сообществ, разработки комплекса агrobiологических технологий с целью повышения продуктивности азотфиксации в растениеводстве, роль которых и практическая значимость до настоящего времени недооценивается.

Азотфиксация выделена, наряду с фотосинтезом, в ряд основных физиологических процессов, а биологический азот рассматривается как фактор сохранения плодородия почвы и формирования продуктивности сельскохозяйственных культур [4]. Известно, что 70...75% азота в составе биомассы урожая сельскохозяйственных культур имеет биотический источник своего происхождения. Им является азот, фиксированный diaзотрофами, и азот минерализованной части органического вещества почвы также преимущественно микробиологического происхождения. То есть сельскохозяйственные растения получают 2/3 необходимого им азота из азотного резерва почв, созданного и поддерживаемого деятельностью микроорганизмов-diazотрофов. Исследованиями установлено, что diaзотрофы способствуют улучшению питания растений на 10...45% [5], а при создании для азотфиксирующих микроорганизмов определенных условий на отдельных полях севооборота можно полностью отказаться от применения минеральных форм азота и получать при этом высокие урожаи зерна озимой пшеницы и других культур [6].

Поскольку практически во всех регионах нашей страны ощущается резкий недостаток в почвах доступных растениям азотосодержащих соединений, а решение этой проблемы только за счет наращивания про-

изводства и применения азотных минеральных и органических удобрений позволяет лишь на 30...33% удовлетворять потребности земледелия, задействование ризосферных азотфиксирующих бактерий является важнейшим резервом повышения продуктивности сельскохозяйственных растений. Кроме того следует учитывать, что интенсивное использование синтетических азотных удобрений кроме положительного эффекта (роста урожайности) несет в себе большую опасность загрязнения азотсодержащими веществами почвы, подпочвенных вод, рек и озер [3]. Очевидно, что использование биологического азота является основным из малозатратных и экологически безопасных способов повышения обеспеченности почвы доступными растениям азотсодержащими соединениями.

При использовании ассоциативных диазотрофов в зависимости от почвенно-климатических условий в агроценозы вовлекается 30...60 кг/га азота из воздуха [4]. Из других источников известно, что масштабы ассоциативной азотфиксации в зоне умеренного климата достигают 50...150 кг/га азота за вегетационный период, а за счет поддержания температуры на уровне 30 °С черноземные и каштановые почвы могут фиксировать до 162...343 кг/га азота, а при оптимизации и других параметров — до 500...1000 кг/га в год [6].

Можно утверждать, что исследование таких аспектов жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, как биологическая фиксация азота и взаимоотношения с высшими растениями, будут способствовать более грамотному и обоснованному планированию мелиоративных режимов, регулированию почвенного плодородия и продуктивности сельскохозяйственных культур [7]. Без понимания сущности микробиологических процессов почвы, умения анализировать и оценивать эти процессы и микрофлору, ответственную за их течение, немислимо совершенствование современных технологий выращивания сельскохозяйственных культур

[8]. Таким образом, процесс повышения продуктивности сельскохозяйственных культур, по нашим представлениям, должен основываться на использовании уникальной способности микроорганизмов к азотфиксации и базироваться на основных принципиальных позициях, показанных на рис. 1.

Использование во второй половине XX в. высокочувствительных методов (изотопный и ацетиленовый) регистрации активности азотфиксации в почве позволило выявить группы микроорганизмов (*Azospirillum*, *Azotobacter*, *Agrobacterium*, *Acetobacter*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Klebsiella*, и др.), обитающих в ризосфере растений и участвующих в этом процессе. Кроме того, это дало возможность найти решение в управлении активностью и регулировании взаимоотношений в ассоциации «растение — азотфиксирующие бактерии» [9]. Установлено, что нитрогеназная активность или способность ферментного комплекса бактерий осуществлять процесс азотфиксации — восстановления молекулярного азота (N_2) до аммиака (NH_3) — выявлена у более 50% бактерий, выделенных из ризосферы небобовых растений, обнаружена высокая отзывчивость ряда сельскохозяйственных культур (особенно злаковые растения) на обработку биопрепаратами азотфиксаторов. Положительное действие на рост и продуктивность растений установлено для многих штаммов бактерий, относящихся к разным систематическим группам [4, 9].

Для активизации жизнедеятельности азотфиксирующих бактерий следует создавать все необходимые условия для их функционирования. Намечились два основных подхода к усилению азотфиксации в агроэкосистемах [8]:

- активизация деятельности спонтанной популяции диазотрофных микроорганизмов в ризосфере и на корнях;

- инокуляция растений (предпосевная обработка семян и внесение в почву) активными штаммами азотфиксаторов и применение микробиологических препаратов.

Первый путь заключается в оптимизации факторов среды и подборе видов, линий, сортов растений, наиболее способных к активной азотфиксации. Второй путь предусматривает использование высокоэффективных в отношении азотфиксации микроорганизмов. Не менее перспективным направлением является подбор и использование специально для этого создаваемых искусственных ассоциаций микроорганизмов, обладающих суммарным положительным эффектом и экологической поливалентностью.

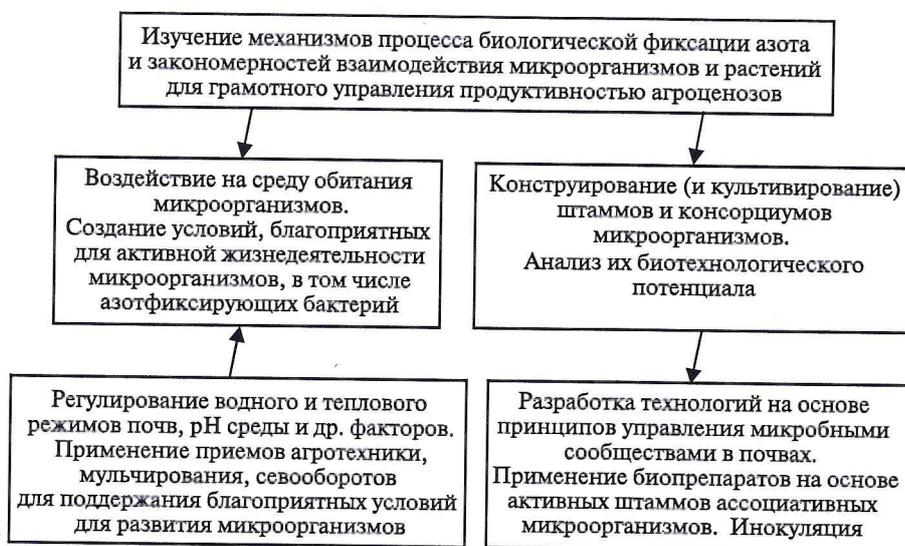


Рис. 1. Принципиальные основы использования способности микроорганизмов к азотфиксации для повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур

Поступление атмосферного азота при формировании биомассы сельскохозяйственных растений за счет ассоциативной азотфиксации значительно варьирует на разных почвах и в различных климатических условиях. Следует отметить, что поступление ассоциативного азота в конкретный агроценоз определяется видом возделываемой культуры и условиями ее выращивания (свойства почвы, ее водный и температурный режимы), которые оказывают существенное влияние как на состав diaзотрофов, так и на их азотфиксирующую активность [9]. Изменение характеристик любого из этих факторов (в том числе под воздействием различных агротехнических мероприятий) приводит к торможению или стимулированию биологической фиксации азота в агроценозе [1]. Действие растений на ассоциативную фиксацию азота заключается в обеспеченности diaзотрофов продуктами экзосмоса и корневого опада: установлено, что 1/3 всего углерода фотосинтеза (даже до 50%) прижизненно выделяется растениями в почву в виде богатых энергией, легкодоступных для микроорганизмов углеводов, являющихся субстратом для бактерий и стимулирующих азотфиксацию вне зависимости от свойств почв [4, 9]. Нитрогеназная активность ризосферных бактерий характеризуется ярко выраженной суточной и сезонной ритмичностью, которая связана с неравномерным поступлением в распоряжение diaзотрофов продуктов фотосинтеза.

Несмотря на существенные различия в биологии культур, существуют общие закономерности в динамике биологического связывания атмосферного азота, обусловленные сходством механизмов процесса и требований к внешним условиям у различных групп азотфиксирующих микроорганизмов. Уровень активности фиксирования атмосферного азота diaзотрофами снижается в ряду чернозема – серые лесные – дерново-подзолистые почвы, что обусловлено структурой микробиоценоза (21...26 – видов diaзотрофов в черноземах, около 15 – в серых лесных почвах, 2...4 вида diaзотрофов в подзолистых почвах) [1]. По мере увеличения влажности почвы интенсивность связывания атмосферного азота diaзотрофами возрастает, при полной водонасыщенности (вследствие развития негативных анаэробных процессов) – снижается. Потенциальная активность азотфиксации больше на известкованных почвах, границы реакции почвенного раствора, в которых ассоциативные diaзотрофы имеют наиболее благоприятные условия для развития, находится в пределах $pH_{KCl} = 5,8...7$. Температура верхнего слоя 0...10 см почвы в течение вегетации слабо влияет на азотфиксацию, однако в филлосфере оптимальная температура воздуха для развития процесса должна находиться в пределах 20...34 °C [4].

Потенциальная азотфиксирующая способность почвы определяется видом агроценоза: независимо от типа почвы максимальная активность азотфиксации проявляется при многолетней культуре трав, введение севооборота снижает ее на 16...20%, а бессменное пашение приводит к падению активности diaзотрофов в 1,7...3,8 раза. Исследования выявили, что при возде-

лывании растений потенциал азотфиксации чернозема в 2...2,3 раза выше, чем каштановой почвы [1].

Основным регулирующим фактором поддержания азотфиксирующего потенциала почв является интенсивность баланса органического вещества. И для поддержания азотфиксирующей активности почвенных diaзотрофов необходимо постоянно обеспечивать высокий уровень поступления в почву свежей органической массы с растительными остатками и удобрениями. Органические вещества, образующиеся при разложении растительных остатков, в значительной мере регулируют состав и численность почвенной микрофлоры, в том числе diaзотрофов. Активизация азотфиксации, происходящая при внесении в почву соломы и других растительных остатков, проявляется в большей степени, когда соотношение углерода к азоту в растительных остатках имеет большие значения [4].

Внесение минеральных азотных удобрений в дозах, не превышающих физиологическую потребность растений (30...80 кг/га в зависимости от культуры), усиливает азотфиксацию и участие биологического азота в питании растений [9]. Следует особо отметить, что diaзотрофы усваивают азот из атмосферы только при отсутствии избыточного количества минеральных соединений азота в почве, при избытке азотных удобрений diaзотрофы прекращают фиксацию атмосферного азота и переходят на доступные минеральные соединения азота, поскольку они более энергоэффективны для бактериальной клетки. По этой причине усвоение бактериями минерального азота, используемого для конструктивного метаболизма, сопровождается денитрификацией почвы. На основе понимания активности выделения N_2O в ризосферных почвах пахотных земель в ответ на различные дозы минерального азота, определения динамики активности нитрогеназы в корневой зоне растений на разных фонах внесения удобрений, сравнительного анализа двух процессов – фиксации азота и денитрификации на пахотных землях – можно достаточно точно определить обоснованные с физиологической точки зрения дозы азотных удобрений, которые не снизят активность азотфиксации и рекомендуются для применения в аграрных технологиях [10].

Открытие азотфиксаторов привело к созданию так называемых микробных или бактериальных удобрений. Уже в 1895 г. запатентован препарат микробной культуры *Nitragin*, который выпускался в 17 вариантах для различных растений и представлял собой культуры азотфиксирующих микроорганизмов, смешанных с почвой, торфом, песком, навозом и другими субстратами. Внесение нитрагина в почву или обработка семян, называемые инокуляцией, позволяли повышать качество и количество продукции. В первой половине 20 века наблюдался неуклонный рост научно-исследовательских работ по созданию перспективных микробных препаратов для бобовых и небобовых культур, однако, с началом бурного развития химической промышленности после второй мировой войны и ориентацией технологий выращивания сельскохозяйственных культур на использование химических удобрений, работы по исследованию микробиологических препаратов стали свертываться [3].

В последние годы в связи с переосмыслением методов и стратегии по использованию биологических и химических источников азотного питания сельскохозяйственных растений интерес к увеличению роли ассоциативной азотфиксации в ризосфере растений, а также к применению препаратов на основе diaзотрофов стал возобновляться. В настоящее время на основе ассоциативных азотфиксирующих микроорганизмов созданы биопрепараты комплексного действия, которые используют в виде инокулянтов различных сельскохозяйственных культур, а также для опрыскивания посевов [5]. Изучение биопрепаратов в течение ряда лет показало достаточно высокую их эффективность как по влиянию на фиксацию азота в ризосфере растений и усилению вклада биологического азота в питание растений, так и по повышению урожайности зерновых культур и сохранению почвенного плодородия. Установлено, что внесение в почву активных штаммов ризосферных микроорганизмов, несмотря на большую вариабельность показателей, в подавляющем большинстве случаев обеспечивает существенный рост интенсивности связывания атмосферного азота (рис. 2) [1].

Исследование особенностей азотфиксации в ризосфере картофеля при использовании различных систем удобрения и микробной инокуляции показали, например, что *Azospirillum sp.* способствуют усвоению азотных соединений инокулированными растениями

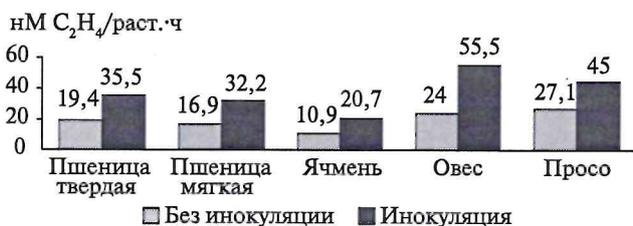


Рис. 2. Влияние инокуляции семян ризозентерином на фиксацию азота в ризосфере зерновых культур

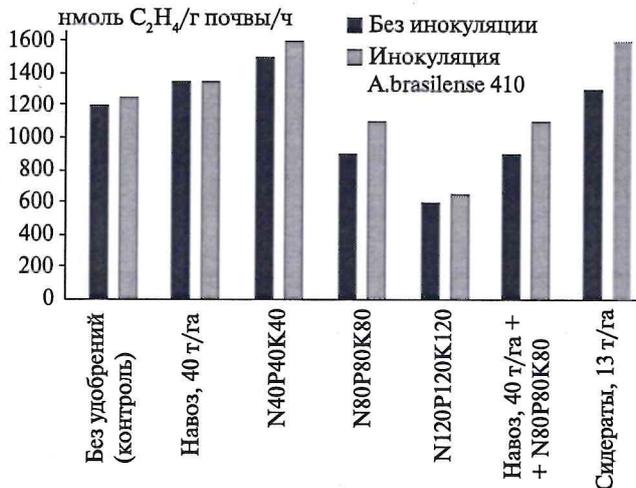


Рис. 3. Динамика потенциальной активности нитрогеназы в ризосферной почве картофеля под воздействием удобрений и микробной инокуляции *A. brasilense* 410

и создают условия для снижения норм внесения химических удобрений за счет более эффективного использования и внесения меньших норм минеральных удобрений на разных стадиях развития растений, к примеру, на стадии роста (рис. 3) [10]. Это подтверждено и другими исследованиями, показавшими значительное повышение эффективности растениеводства в результате инокуляции.

Исследования установили, что инокуляция сельскохозяйственных культур стимулировала активность нитрогеназы в ризосферной почве в вариантах с низкими и средними нормами внесения минеральных удобрений. Кроме того, результаты исследований по влиянию доз удобрений и инокуляции на продуктивность сельскохозяйственных культур (урожайность картофеля) показали, что сочетание инокуляции с минеральными удобрениями оказывает наибольшее влияние на повышение урожайности в тех же вариантах опыта: урожайность увеличилась на 14,3% на фоне N₄₀P₄₀K₄₀ и на 12,3% на фоне N₈₀P₈₀K₈₀. Влияние *A. brasilense* на продуктивность культуры эквивалентно действию минеральных удобрений в дозе N₄₀P₄₀K₄₀, что указывает на возможность сокращения количества минеральных удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур в сочетании с инокуляцией для достижения запланированного результата [10].

Эффективность биопрепаратов на основе активных штаммов diaзотрофов определяется погодными условиями вегетационного периода и уровнем плодородия почвы. При количестве осадков, близком к среднегодовой норме, применение биопрепаратов эквивалентно внесению азотного удобрения под озимые пшеницу, рожь и тритикале, а также ячмень и овес в дозе N₃₀, под яровую пшеницу – N₃₀₋₄₅, под кукурузу – N₄₅₋₆₀ и под картофель N₄₀₋₄₅. По обобщенным данным разных исследований применение биопрепаратов, созданных на основе активных штаммов ассоциативных микроорганизмов, приводит к росту урожайности зерновых в среднем на 15...20%, овощных и других сельскохозяйственных культур – не менее 20...30% [4]. Положительные результаты от инокуляции препаратами *Azospirillum*, выраженные прибавкой урожая 5...40%, получены зарубежными исследователями.

Применение биологических препаратов, созданных на основе активных штаммов микроорганизмов, обладающих повышенной способностью к ассоциации с культурными растениями и интенсивной азотфиксацией является важным фактором, определяющим эффективность ассоциативной азотфиксации. Среди факторов окружающей среды, влияющих на азотфиксацию при использовании микробных препаратов, следует отметить: влажность и гранулометрический состав почвы; содержание, качественный состав и распределение органического вещества по профилю почвы; погодные условия вегетации растений, температура почвы и воздуха, концентрация углекислоты в филлосфере [4].

При благоприятных условиях влажности и температуры почвы активность нитрогеназы возрастает в зависимости от применяемого препарата и выращиваемых культур в 1,5...2,2 раза в сравнении с естествен-

ным фоном, причем чем лучше растения обеспечены водой, тем выше эффект от инокуляции. Активизация азотфиксирующей деятельности при инокуляции сопровождается усилением ростовых процессов в растениях. Так, при изучении влияния бактериальных удобрений (Азоризин, Ризоргин, Д-12, Д-65) на формирование биомассы зерновых культур существенный прирост биомассы отмечен к фазе цветения, прирост сухой биомассы в зависимости от применяемого био-препарата составил в среднем 11...35% у проса, 17...30% у пшеницы и 30...60% у ячменя [1].

Целесообразность искусственного обогащения ризосферы небобовых растений отобранными штаммами diaзотрофных бактерий обосновано, наряду с их способностью активного связывания молекулярного азота, комплексным положительным воздействием на растения. Применение микробных препаратов, изготовленных на основе стимулирующих рост ризобактерий, ассоциативных к конкретному виду растения, оказывает многостороннее положительное влияние на растения. Интродуцируемые бактерии, благодаря синтезу ростстимулирующих и антибиотических веществ, способствуют лучшему росту и развитию растений, подавлению стрессовых реакций у растений (за счет синтеза микроорганизмами органических соединений, повышающих иммунитет растений, особенно на ранних стадиях их развития), ограничивают рост фитопатогенов, что повышает их устойчивость к неблагоприятным биотическим и абиотическим факторам [2].

Анализ результатов учета урожая зерновых культур показал [1], что прирост урожая от инокуляции препаратами корневых diaзотрофов в подавляющем большинстве случаев находился в пределах 10...20% к уровню продуктивности не инокулированных посевов, что сопоставимо с действием минерального азота в дозе N_{20-40} . В некоторых случаях эффекты от инокуляции в прибавке урожая достигали у проса и ячменя соответственно 47...68 и 35...37%. Лучшими инокулянтами, обеспечивающими статистически существенный рост концентрации азота и повышение содержания белка в зерне, следует назвать следующие: для твердой пшеницы – азоризин и флавобактерин, для мягкой пшеницы – азоризин и ризоагрин, для овса – ризоагрин и биоплант.

Эффективность применения био-препаратов ассоциативных diaзотрофов в посевах яровых зерновых культур определяется типом почв. Применение ризоагрина (*Agrobacterium radiobacter* um. 204) и флавобактерина (*Flavobacterium* sp. L-30) способствует получению средневзвешенной прибавки урожайности зерна яровой пшеницы на черноземах до 23%, серых лесных – до 14%, дерново-подзолистых почвах – на 13...18%. Прибавка урожайности зерна ячменя от инокуляции био-препаратами составляла для этих типов почв соответственно 12, 11 и 13...19% [4]. Коэффициент использования азота минеральных удобрений яровой пшеницей при инокуляции семян этими био-препаратами возрастает на дерново-подзолистых почвах с 36...50% до 39...60%, серых лесных почвах – с 29 до 31% и черноземах – с 28 до 46%; у ячменя соответственно с 39...49% до 46...58%, с 39 до 52%, с 31 до 36%. Инокуляция се-

мян био-препаратами способствует повышению окупаемости азота минеральных удобрений в посевах яровой пшеницы и ячменя: на черноземах в 2,3 и 2,4 раза, на дерново-подзолистых почвах – в 1,5...2,1 и 1,6...2, на серых лесных – в 2,1 и 1,8 раза соответственно [9].

Количество дополнительно усвоенного растениями азота в результате прямого и косвенного действия инокуляции в абсолютном выражении составляет в среднем 2...3 г/м² за вегетацию, или 20...30 кг в пересчете на гектар. На основании полученных результатов многих исследований можно утверждать, что это реальное и существенное поступление биологического азота в агроценоз под влиянием препаратов корневых diaзотрофов [1].

По результатам исследований можно заключить, что применение бактериальных удобрений на основе корневых diaзотрофов позволяет в 1,5...2 раза увеличить азотфиксирующую активность в ризосфере зерновых культур и повысить продуктивность агроценозов на 15...40% [1]. При этом отмечается увеличение содержания белка в зерне на 0,4...1%, в зависимости от препарата, выращиваемой культуры и условий увлажнения. Различная ответная реакция культур на тот или иной био-препарат связана с их биологическими особенностями, с адаптацией применяемых штаммов микроорганизмов к сообществу микрофлоры почвы и с их устойчивостью к изменениям гидротермического режима в период вегетации растений. Это вызывает необходимость подбора наиболее эффективного в конкретных условиях ассоциативного комплекса «штамм микроорганизма – культура».

Изучение влияния препаратов на основе высокоэффективных штаммов азотфиксаторов на биологическую активность почвы, продуктивность возделываемой пшеницы и размеры азотфиксации в различные по увлажненности годы показало, что в засушливом году (ГТК=0,68) существенных различий в количестве микроорганизмов между вариантами опыта с применением био-препаратов и контролем не обнаружено. При более значительном увлажнении вегетационного периода (ГТК > 1), общая численность микроорганизмов в ризосфере пшеницы при инокуляции семян био-препаратами возрастала в варианте с препаратом БиоВайс на 25 и 50%, с Ризоагрином – на 19 и 37% относительно контроля. Помимо этого, под влиянием био-препаратов существенно, на 61...70% увеличилось количество нитрификаторов, на 30...45% – фосфатмобилизующих бактерий, на 19 и 45% усилилась целлюлозолитическая активность почвы. За счет ассоциативной азотфиксации дополнительно к почвенному азоту, используемому растениями, получено 11...16 кг N/га при инокуляции семян пшеницы Ризоагрином и 8...10 кг/га – при инокуляции БиоВайсом, а прибавка урожайности пшеницы в среднем составила 1,5...1,6 ц/га (6,9...7,4%) к контролю [5].

Для активизации процесса биологической фиксации азота в однолетних агроценозах на черноземах с целью повышения продуктивности зерновых и зернобобовых культур рекомендуется применять следующие препараты азотфиксирующих бактерий [1]: для яровой пшеницы – азоризин, ризоэнтерин; ячменя – флаво-

бактерин, ризоагрин; овса – ризоэнтерин, биоплант; проса – ризоэнтерин, серацил; горохово-овсяной смеси – шт. 245а + ризоэнтерин. Зернобобовые культуры, за исключением сои, целесообразно выращивать без дополнительного основного внесения азотных удобрений даже при низкой обеспеченности почвенным азотом. Оптимизацию азотного питания посевов сои рекомендуется осуществлять комплексным применением минеральных (N_{30-60}) и бактериальных удобрений с учетом содержания доступного азота в почве и условий увлажнения.

Можно утверждать, что создание и применение биопрепаратов на основе азотфиксирующих микроорганизмов является наиболее эффективным приемом повышения продуктивности растений и качества их урожая, позволяющим сохранять естественное плодородие почв и экологическое равновесие окружающей среды. Их использование дает возможность регулировать численность и активность полезной микрофлоры в ризосфере возделываемых культур, а также обеспечивать растения азотом, фиксированным из атмосферы. Для практического применения микроорганизмов создают их различные препаративные формы, такие как жидкая культура, препараты на гелевых субстратах (бактериальные экзополисахариды, силикагель, высокодисперсные материалы) и твердых носителях (вермикулит, лигнин, перлит, торф) [11].

На основе ассоциативных азотфиксирующих бактерий разработана технология производства биопрепаратов – диазофита (ризоагрина) для пшеницы и риса, биоагентом которого является *Agrobacterium radiobacter* 204; и ризоэнтерина под ячмень, биоагентом которого является *Enterobacter aerogenes* 30-а. Для инокуляции семян пшеницы, ячменя, озимой ржи, проса и риса применяется также препарат диазобактерин на основе *Azospirillum brassilense*. Для повышения продуктивности овощных культур (томатов, капусты, сахарной свеклы, моркови и картофеля) рекомендован препарат азотобактерин, состоящий из консорциума *A. chroococcum* 21 и *A. vinelandii* 22. На основе diaзотрофов из рода

Klebsiella разработаны препараты биоплант К и клефс, повышающие продуктивность овощных культур за счет оптимизации азотного питания и фунгистатического действия. Показана также эффективность инокуляции семян различных культур препаратами флавобактерин на основе *Flavobacterium sp. L30* и мизорин – на основе штамма *Arthrobacter misorens* 7. За последние десятилетия перечень биотехнологических продуктов – микробных препаратов для растениеводства значительно расширился и включает препараты, созданные на основе свободноживущих, ассоциативных, симбиотрофных азотфиксирующих и фосфатмобилизирующих бактерий, а также препаратов бинарного действия, получаемых в результате сочетания различных микроорганизмов (таблица) [11].

Созданные биологические препараты на основе полезных микроорганизмов являются отличной альтернативой минеральным удобрениям, однако они еще не получили достаточно широкого применения, что, естественно, не способствует решению ряда существующих экологических и экономических проблем [11]. Применение бактериальных препаратов в технологиях повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур ведет к незначительному удорожанию производства продукции, при этом экономический эффект применения азотфиксирующих бактерий достигается за счет стоимости дополнительного урожая, экономии минеральных удобрений и снижения других производственных затрат.

Выводы. Технологии формирования ризосферы растений с использованием ассоциативных бактерий способствуют повышению устойчивости и продуктивности агроэкосистем, сохранению окружающей среды и восстановлению почвенного плодородия. Всестороннее исследование растительно-бактериальных ассоциаций и взаимодействий, факторов и приемов, оказывающих на них влияние, выяснение основных закономерностей регулирования жизнедеятельности микрофлоры с целью повышения ее значения в питании растений сделало возможным целенаправленное при-

Биопрепараты на основе азотфиксирующих микроорганизмов для повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур

Препарат	Препаративная форма	Применение
Азотобактерин	Жидкая, лигниновая	Под овощные и кормовые культуры, сахарную свеклу. Улучшает азотное питание, защищает растения от фитопатогенов, повышает урожайность на 10...25%
Азогран	Гранулированный азотобактерин	
Ризобифит (Ризоторфин)	Жидкая, гелевая, вермикулитная, перлитная	Обеспечивает бобовые растения биологическим азотом на 30% и более, повышает урожайность на 10...30%
Диазофит (Ризоагрин)	Жидкая, гелевая, вермикулитная, торфяная	Оптимизируют азотное питание, угнетают развитие фитопатогенов. Повышают урожайность озимой и яровой пшеницы на 3...7 ц/га, ячменя – на 4...5 ц/га
Ризоэнтерин		
Диазобактерин		
Флавобактерин	Гелевая, торфяная	Под озимую пшеницу, рожь, ячмень, злаковые травы. Оптимизирует азотное питание и повышает урожайность
Полимиксобактерин	Жидкая	Улучшает фосфорное и азотное питание сахарной свеклы и других культур, продуцирует стимуляторы роста и антибиотики, создан на основе бактерий рода <i>Bacillus</i> , повышает урожайность на 6...14%
Биоторфяное удобрение комплексного действия	Торфяная	Бинарный препарат на основе азотобактера и фосфат мобилизирующих бактерий, применяемый под овощные, ягодные и цветочные культуры. Улучшает азотное и фосфорное питание, защищает от фитопатогенов, повышает урожайность на 20...25%

менение биологической фиксации азота на практике и открыло перспективы управления этим процессом.

Учитывая нарабатанный опыт и анализ полученных результатов исследований процесса биологической азотфиксации и взаимоотношений между растениями и микроорганизмами, а также конкретных рекомендаций применения биопрепаратов на основе диазотрофов можно регулировать как эффективность протекания процесса азотфиксации, так и совершенствовать современные технологии выращивания, повышения продуктивности и азотного питания сельскохозяйственных культур для разных природно-климатических условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шотт П.Р. Биологическая фиксация азота в однолетних агроценозах лесостепной зоны Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Барнаул, 2007. 39 с.
2. Тихонович И.А., Завалин А.А. Перспективы использования азотфиксирующих и фитостимулирующих микроорганизмов для повышения эффективности агропромышленного комплекса и улучшения агроэкологической ситуации РФ // Плодородие, 2016. № 5. С. 28–32.
3. Игнатов В.В. Биологическая фиксация азота и азотфиксаторы // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 9. С. 28–33.
4. Завалин А.А. Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур / А.А. Завалин, А.А. Алферов, Л.С. Чернова // Агрохимия, 2019, № 8. С. 83–96.
5. Хамова О.Ф., Н Шулико Н., Тукмачева Е.В. Эффективность применения биопрепаратов ассоциативной азотфиксации в ресурсосберегающих технологиях // Агрохимия. 2022. № 9. С. 47–52.
6. Остапенко А.П., Фалынсков Е.М. Пути повышения продуктивности и снижения ресурсоемкости земледелия Ростовской области // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2014. № 12. URL: <https://agro.snauka.ru/2014/12/1744> (дата обращения: 11.09.2024).
7. Максимов С.А., Стрельбицкая Е.Б., Ремез И.А. Оценка взаимодействия диазотрофов и сельскохозяйственных растений при обосновании комплексных мелиораций // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 2. С. 14–20.
8. Дегтярева И.А. Эколого-физиологическая регуляция взаимодействия в агроценозе растений рода *Amaranthus L.* и диазотрофов: дис. ... д-ра биол. наук: 06.01.04, 03.00.16. М., 2005. 279 с.
9. Алферов А.А. Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы. М.: РАН, 2020. 184 с.
10. Биологическая фиксация азота и денитрификация в ризосфере картофеля в ответ на внесение удобрений и инокуля-

цию / В.В. Волкогон, Е.И. Волкогон, Н.В. Волкогон, С.Б. Димова, В.П. Сидоренко. URL: www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2021.606379/full (дата обращения 17.06.2025).

11. Сытников Д.М. Биотехнология микроорганизмов – азотфиксаторов и перспективы применения препаратов на их основе // Биотехнология. 2012. Т. 5, № 4. С. 34–45.

REFERENCES

1. Schott P.R. Biological nitrogen fixation in annual agrocenoses of the forest-steppe zone of Western Siberia: abstract dis. ... Doctor of Agricultural Sciences. Barnaul, 2007. 39 p.
 2. Tikhonovich I.A., Zavalin A.A. Prospects for the use of nitrogen-fixing and phytostimulating microorganisms to increase the efficiency of the agro-industrial complex and improve the agroecological situation in the Russian Federation // Fertility, 2016. No. 5. Pp. 28–32.
 3. Ignatov V.V. Biological nitrogen fixation and nitrogen fixers // Sorosovsky Educational Journal, No. 9, 1998, Pp. 28–33.
 4. Zavalin A.A., Alferov A.A., Chernova L.S. Associative nitrogen fixation and the practice of using biological products in crops // Agrochemistry. 2019. No. 8. Pp. 83–96.
 5. Khamova O.F., Shuliko N.N., Tukmacheva E.V. The effectiveness of the use of biological products of associative nitrogen fixation in resource-saving technologies // Agrochemistry. 2022. No. 9. Pp. 47–52.
 6. Ostapenko A.P., Falynskov E.M. Ways to increase productivity and reduce the resource intensity of agriculture in the Rostov region // Agriculture, forestry and Water Management, 2014. No. 12. URL: <https://agro.snauka.ru/2014/12/1744> (date of reference: 09/11/2024).
 7. Maksimov S.A., Strelbitskaya E.B., Remez I.A. Assessment interactions of diazotrophs and agricultural plants in the justification of complex land reclamation // Land reclamation and water Management. 2025. No. 2. Pp. 14–20.
 8. Degtyareva I.A. Ecological and physiological regulation of interaction in the agrocenosis of plants of the genus *Amaranthus L.* and diazotrophs: dis... Doctors of Biological Sciences: 06.01.04, 03.00.16. Moscow, 2005. 279 p.
 9. Alferov A.A. Associative nitrogen, yield and sustainability of agroecosystem. M.: RAS, 2020. 184 p.
 10. Volkogon V.V., Volkogon E.I., Volkogon N.V., Dimova S.B., Sidorenko V.P. Biological nitrogen fixation and denitrification in the potato rhizosphere in response to fertilization and inoculation. URL: www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2021.606379/full (accessed 17.06.2025).
 11. Sytnikov D.M. Biotechnology of nitrogen fixing microorganisms and the prospects of using drugs based on them // Biotechnology. 2012. Vol. 5, No. 4. Pp. 34–45.
- Стрельбицкая Елена Брониславовна**, канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник, strelbitskaya.elena@mail.ru (ФНЦ «ВНИИГИМ имени А.Н. Костякова», Россия, г. Москва).

УДК 631.432.2

DOI: 10.32962/0235-2524-2025-5-13-16

РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО РЕЖИМА АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ТОФЯНИСТО-ГЛЕЕВЫХ ПОЧВ

С.Э. БАДМАЕВА

Ключевые слова: орошение, пойменные почвы, плодородие, водный режим, затопление, регулирование, многолетние травосмеси, урожайность.

Keywords: irrigation, floodplain soils, fertility, water regime, flooding, regulation, perennial grass mixtures, yield.

Аннотация. Пойменные почвы, представленные аллювиальными торфяно-глеевыми почвами, распространены в долинах рек Белый и Черный Июс в Республике Хакасия, фонд этих земель составляет око-

ло 23 тыс. га. Эти земли в основном используются как естественные сенокосы и пастбища, также присутствуют культурные пастбища с загонной системой вытаса и сеяные сенокосы. Почвы обладают высоким потенциальным плодородием, но в засушливые годы урожайность сельскохозяйственных культур низкая. Регулирование водного режима этих почв с забором воды из источников – рек позволит оптимизировать водный баланс и повысить урожайность культур. Для земель, расположенных в поймах рек, эффективным способом орошения является полив затоплением по чекам или как его называют лиманным орошением.