

16. Ермаков, А. И. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков. – Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд., 1987. – 430 с.
17. Мережко, А. Ф. Система генетического изучения исходного материала для селекции растений / А. Ф. Мережко. – Л.: ВИР, 1984. – 70 с.

УДК 631.81.095.337(476)

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕПАРАТЫ – НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Коженевский О. Ч., Семенчук М. С., Коженевский Э. О.

УО «Гродненский государственный аграрный университет»

г. Гродно, Республика Беларусь

Аннотация. Микроорганизмы являются важным элементом в моделировании устойчивого сельского хозяйства, способствуя круговороту питательных веществ, росту растений и сохранению и повышению почвенного плодородия. В данном обзоре рассматриваются вопросы многомерного применения микробных препаратов в современном сельскохозяйственном производстве с акцентом на их потенциал в поддержании здоровья почвы, повышении продуктивности сельскохозяйственных культур и обеспечении экологической устойчивости.

Summary. Soil microorganisms are key enablers of agricultural frontiers, contributing to nutrient cycling, plant growth, and maintaining and enhancing soil fertility. This review examines the multifaceted application of microbial agents in modern agricultural production, emphasizing their potential to support soil health, enhance crop productivity, and ensure sustainability.

Ключевые слова: микробиом, ризосфера, биоинокулянты, почвенное плодородие, стрессоустойчивость, биостимуляторы.

Key words: microbiome, rhizosphere, bioinoculants, soil fertility, stress resistance, biostimulants.

Одной из насущных проблем, стоящих перед современным сельскохозяйственным производством, является достижение устойчивого производства сельскохозяйственной продукции для обеспечения продовольственной безопасности. Изменение климата только усугубило воздействие таких экологических стрессов, как засуха, неравномерное распределение осадков, экстремальные температуры и деградация почв на мировое производство продовольствия [1]. Кроме того, современная сельскохозяйственная практика использования удобрений и химических мелiorантов как основного фактора повышения урожайности привела к разрушительным экологическим последствиям для здоровья человека и плодородия почвы [2]. Несбалансированное использование удобрений и не рациональное обращение с растительными остатками и органикой, неправильная стратегия управления питательными веществами приводит к

нарушению микробного разнообразия и плодородия почвы [3, 4]. Следовательно, для минимизации указанных негативных явлений необходимо разрабатывать и исследовать новые методы, в частности применение полезных микроорганизмов в сельскохозяйственной практике [5].

Как известно, процесс почвообразования, уровень эффективного плодородия, рост и развитие растений, их устойчивость к стрессовым факторам, круговорот питательных веществ и локализация углерода – все это прямо или косвенно зависит от почвенного микробиома – микробных сообществ, связанных с растениями и имеющих решающее значение для их здоровья и адаптации к факторам окружающей среды [6]. Перспективным направлением для повышения плодородия почвы и стимуляции продуктивности растений в агроэкосистемах является применение полезных микроорганизмов, стимулирующих рост растений (PGPB, Plant Growth-Promoting Bacteria) [7].

Микроорганизмы естественным образом колонизируют почву и растительные системы. Наиболее динамичным микросообществом, регулируемым взаимодействием корней растений и почвы, является ризосфера. В ризосфере обитает огромное количество бактерий, грибов и простейших, которые привлекаются корневыми выделениями растений. Внутри и между этими живыми организмами происходит множество взаимодействий, которые могут быть положительными, нейтральными или отрицательными и могут существенно влиять на рост и развитие растений [6,8]. PGPB естественным образом прямыми и косвенными способами оказывают многочисленные благоприятные воздействия на растительную экосистему, включая фиксацию и растворение питательных веществ [9], повышение устойчивости к абиотическим стрессам [10], производство фитостимуляторов, таких как фитогормоны [11] и сидерофоры [12], подавление болезней [13], активация роста и повышение урожайности и многие другие положительные эффекты.

Одним из наиболее известных примеров ризосферного взаимодействия и эффективных приемов применения микробных инокулянтов является повышение доступности питательных элементов для растений. В частности, бактерии *Rhizobium* индуцируют образование клубеньков в клетках корней бобовых, где преобразуют атмосферный азот (N_2) в аммиак (NH_3) или другие формы, которые впоследствии поглощаются растениями для образования белков, аминокислот и других необходимых компонентов растений [14]. Благодаря такому взаимодействию бобовые растения могут поглощать 100-150 кг азота на гектар в год, что обеспечивает не только повышение продуктивности растений, но и плодородия почв [15]. *Azospirillum* вступает во взаимодействие со злаковыми культурами, таким как пшеница и кукуруза, фиксируя азот в ризосфере, особенно в условиях, когда он находится в почве в первом минимуме [16].

Таким образом, инокуляция ризобиями позволяет максимально увеличить фиксацию азота, что не только повышает урожайность культур, но и снижает зависимость от синтетических азотных удобрений, что, в свою очередь снижает затраты и является экологически безопасным приемом.

Также фосфор и калий часто присутствуют в почве в формах, недоступных для растений, в нерастворимом состоянии. Некоторые микробные инокулянты, например, *Bacillus* и *Pseudomonas*, посредством образования органических кислот и других метаболитов мобилизуют фосфор и калий из почвенных минералов и повышают его доступность для растений [17, 18]. В условиях дефицита фосфора или калия использование данных бактерий во многих случаях приводит к увеличению урожайности [19].

Микробные инокулянты не только увеличивают запас питательных веществ, но и непосредственно стимулируют рост растений посредством синтеза веществ, регулирующих рост, таких как витамины, ферменты и фитогормоны [20]. Ауксины, цитокинины и гиббереллины – это некоторые из гормонов роста растений, синтезируемых многими полезными микроорганизмами, в частности PGPB, которые непосредственно стимулируют рост растений, влияя на закладку корней, деление клеток и метаболизм растений [21]. Например, индол-3-уксусная кислота (ИУК), синтезируемая видами *Azospirillum*, увеличивает поглощение питательных веществ и воды. Цитокинины ускоряют рост растений, стимулируя деление клеток и развитие побегов. Гиббереллины способствуют удлинению стебля и общему росту растений, облегчая прорастание семян и рост. Инокуляция продуцирующими ауксины PGPB потенциально может максимально увеличить поглощение питательных веществ и повысить биомассу корней у таких культур, как рис, кукуруза и пшеница [22]. Ауксины, синтезируемые некоторыми бактериями, такими как *Azospirillum*, *Bacillus* и *Pseudomonas*, стимулируют удлинение и ветвление корней, усиливая поглощение воды и питательных веществ [23], что особенно важно в стрессовых условиях, таких как засуха. PGPB также синтезируют витамины, в том числе витамины группы B, и ферменты, которые улучшают метаболизм растений. В частности, виды *Bacillus* могут производить фолиевую кислоту и биотин, которые необходимы для роста растений [24].

Микроорганизмы, присутствующие в ризосфере, снижают заболеваемость, защищая растения от болезней, передающихся через почву. Известно несколько механизмов подавления почвенных заболеваний: полезные микроорганизмы, такие как *Bacillus* и *Pseudomonas*, конкурируют с патогенными микробами за ресурсы и пространство, тем самым подавляя их развитие [25], а также индуцируют системную устойчивость (ISR), которая активирует иммунную систему растений к сопротивлению инфекциям; некоторые PGPB, такие как грибы рода *Trichoderma*, производят

вторичные метаболиты, ферменты и антибиотики, а также другие анти-микробные вещества, тем самым снижают вызванные патогенами корневые заболевания и защищают растения от корневой гнили, вызываемой такими грибами, как *Fusarium* и *Rhizoctonia* [26]. Доказано, что инокулянты PGPB способны снижать заболеваемость корневой гнилью у таких овощей, как томаты и огурцы. Виды *Bacillus* могут снижать тяжесть заболевания, особенно в случае бактериальных и грибковых заболеваний, таких как мучнистая роса и фузариозное увядание [27].

Сложно переоценить роль почвенных микроорганизмов в сохранении и повышении почвенного плодородия. В частности, целлюлолитические бактерии, выделяя ферменты (целлюлазы, хитиназы и фосфатазы) способствуют разложению органических соединений и повышают доступность питательных веществ. Внеклеточные полисахариды, образующиеся в результате агрегации почвы из микоризных грибов и некоторых бактерий, включая *Bacillus*, связывают частицы почвы и образуют стабильные почвенные агрегаты [28]. В совокупности эти процессы, способствуя разложению органического вещества, усиливая агрегацию почвы, улучшая аэрацию почвы и водоудерживающую способность, улучшают структуру почвы, что, в свою очередь, уменьшает эрозию почвы, улучшает инфильтрацию воды и повышает устойчивость почвы к внешним воздействиям [29].

Микробные инокулянты повышают способность растений противостоять различным стрессовым факторам окружающей среды, включая загрязнение и засоление почвы, засуху и экстремальные температуры, что в последние годы становится весьма актуальным. Многие PGPB производят такие соединения, как осмопротекторы, включая пролин и трегалозу, которые защищают клетки растений от обезвоживания в периоды чрезмерного засоления или засухи и помогают регулировать осмотический стресс у растений или запускают защитные механизмы самого растения [30].

Таким образом, микробиологические технологии могут улучшить здоровье почвы и снизить зависимость от удобрений, химических мелиорантов и других синтетических соединений. Применяя полезные микроорганизмы, такие как микоризные грибы, фосфатмобилизирующие и азотфиксирующие бактерии и др., возможно повысить плодородие почвы, устойчивость растений к засолению и засухе, снизить их заболеваемость, что в итоге будет способствовать повышению урожайности и экологической безопасности. Однако в современных условиях существуют препятствия, такие как предпочтение интенсивным технологиям и разница в эффективности микроорганизмов, которые необходимо преодолеть для широкого применения биоинокулянтов. Микробиологические решения должны стать центральным элементом устойчивых

методов ведения сельского хозяйства в перспективе при переходе сельского хозяйства к более ответственному с точки зрения климата стратегиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малхи, Г. С. Влияние изменения климата на сельское хозяйство и стратегии его смягчения: обзор / Г. С. Малхи, М. Каур, П. Каушик // Устойчивое развитие – 2021, № 13, 1318.
2. Гомиеро, Т. Деградация почвы, дефицит земель и продовольственная безопасность: обзор сложной проблемы / Т. Гомиеро // Устойчивое развитие – 2016, № 8, 281.
3. Патра, С. Моделирование влияния химических удобрений на сельскохозяйственное производство: тематическое исследование округа Хугли, Западная Бенгалия, Индия / С. Патра, П. Мишра, С. К. Махapatра, // Model. Earth Syst. Environ. – 2016, № 2, 1-11.
4. Ларионов, Ю. С. Альтернативные подходы к современному земледелию и наращиванию плодородия почв (новая парадигма) / Ю. С. Ларионов // Экология и природопользование. – 2013. – № 7. – С. 49-60.
5. Потенциальное использование полезных микроорганизмов для улучшения почвы, биологического контроля фитопатогенов и устойчивого растениеводства в агроэкосистемах мелких фермерских хозяйств / Г. Коскей [и др.] // Front. Sustain. Food Syst. – 2021, № 5, 130.
6. Мендес, Р. Микробиом ризосферы: значение полезных для растений, патогенных для растений и патогенных для человека микроорганизмов / Р. Мендес, П. Гарбева, Дж. М. Рааймакерс // FEMS Microbiol. Rev. – 2013, № 37, 634-663.
7. Бактерии, стимулирующие рост растений, как альтернативная стратегия повышения солеустойчивости растений: обзор / М. Нуман [и др.] // Микробиологические исследования. – 2018, № 209: 21-32
8. Филиппо, Л. Возвращение к истокам: микробная экология ризосферы / Л. Филиппо, Дж. М. Рааймакерс, П. Леманно // Nat. Rev. Microbiol. – 2013, № 11, 789-799.
9. Тимофеева, А. Перспективы использования фосфаторастворяющих микроорганизмов в качестве природных удобрений в сельском хозяйстве / А. Тимофеева, М. Галямова, С. Седых // Растения. – 2022, № 11, 2119.
10. Смягчение засушливого стресса у итальянской ситарии (*Setaria italica* L.) с помощью засухоустойчивых микроорганизмов, растворяющих фосфор и обладающих разнообразными свойствами, способствующими росту растений / Д. Кур [и др.] // Environ. Sustain. – 2020, № 3, 23-34.
11. Ван, Л. Судьба генов устойчивости к антибиотикам и изменения в бактериальном сообществе при увеличении масштабов селекции навоза кур-несушек / Л. Ван, Б. Чай // Front. Microbiol. – 2022, № 13, 857046.
12. Тимофеева, А. М. Бактериальные сидерофоры: классификация, биосинтез, перспективы применения в сельском хозяйстве / А. М. Тимофеева, М. Р. Галямова, С. Е. Седых // Растения. – 2022, 11, 3065.
13. Функция стимуляции роста растений штаммов *Bacillus* sp., выделенных из ризосферы солончака, и их потенциал биоконтроля против *Macrophomina Phaseolina* / С. Кастальди [и др.] // Int. J. Mol. Sci. – 2021, № 22, 3324.
14. Механизмы, лежащие в основе симбиоза бобовых и ризобий / Дж. Ян [и др.] // Журнал интегративной биологии растений. – 2022, № 64, 244-267.
15. Улучшение плодородия почвы с помощью симбиотических ризобий для устойчивого сельского хозяйства. Почва. Плодородие. Управление / С. С. Синдху [и др.] // Устойчивое развитие. – 2019, № 1, 101-166.
16. Маркос, Д. Восстановление производства кукурузы путем управления биологической фиксацией азота, закислением почвы и выбросами закиси азота бобовыми культурами в тропиках / Д. Маркос, Т. Йозеф // Afr. J. Environ. Sci. Technol. – 2024, № 18, 21-40.
17. Улучшение усвоения фосфора (P) растениями с помощью фосфаторастворяющих бактерий / М. С. Ариф [и др.] // Essent. Plant Nutr. Uptake Use Effic. Manag. – 2017, № 1, 513-556.

18. Использование почвенных микробных растворителей калия для повышения доступности калия в почве и его динамики / Ф. Т. Оланиян [и др.] // *Ann. Microbiol.* – 2022, № 72, 45.
19. Роль фосфатсолобилизирующих микроорганизмов от борьбы с дефицитом фосфора в почве до опосредования биогеохимического цикла фосфора / Дж. Тянь [и др.] // *Биология.* – 2021, № 10, 158.
20. Детерминанты колонизации ризосферы ризобактериями, способствующими росту растений (PGPR) / Г. Сантойо [и др.] // *Биология.* – 2021, № 10, 475.
21. Полезные свойства ризобактерий, стимулирующих рост растений, для улучшения роста и здоровья растений в сложных условиях: методический обзор / Э. Оленска [и др.] // *Sci. Total Environ.* – 2020, № 743, 140682.
22. Улучшение роста и урожайности рапса (*Brassica napus* L.) за счет продукции ауксина и повышения усвоения питательных веществ с помощью растительных микроорганизмов / М. Икбал [и др.] // *Журнал почв и отложений.* – 2023, № 23, 12331249.
23. Влияние ауксина и ауксинпродуцирующих бактерий на рост, выход эфирного масла и его состав в лекарственных и ароматических растениях / Р. Чакмакчи [и др.] // *Curr. Microbiol.* – 2020, № 77, 564-577.
24. Микробные витамины в питании и здравоохранении. В книге «Микробные витамины и каротиноиды в пищевой биотехнологии» / Б. Шайда [и др.] // *Academic Press: Кембридж, Массачусетс, США.* – 2024. – С. 223-260.
25. Биологический контроль патогенов с использованием бактерий, стимулирующих рост растений (PGPR): роль бактериального разнообразия / Х. Ван [и др.] // *Микроорганизмы.* – 2021, № 9, 1988.
26. Оценка сигнальных путей салициловой кислоты (SA) и молекулярных маркеров в растениях, обработанных *Trichoderma*, в условиях засоления и фузариозного стресса / С. Боама [и др.] // *Обзор. Eur. J. Plant Pathol.* – 2023, № 166, 259-274.
27. Блейк, К. Молекулярные аспекты стимуляции роста и защиты растений с помощью *Bacillus subtilis* / К. Блейк, М. Н. Кристенсен, А. Ковач // *Молекулярные взаимодействия растений и микроорганизмов.* – 2021, № 34(1): 15-25.
28. Могут ли методы молекулярной генетики улучшить наше понимание роли микробной биомассы в агрегации почвы? / Р. Каур [и др.] // *Eur. J. Soil Sci.* – 2022, 73, e13307.
29. Процессы инфильтрации почвы и удержания воды, а также стратегии повышения их способности / Р. Пан [и др.] // *Журнал экспериментального сельского хозяйства.* – 2018, № 20, 1-14.
30. Обзор последних достижений и перспектив улучшения антиоксидантного механизма при увеличении количества PGPR в растениях в условиях засухи: обзор / Х. Г. Гоутам [и др.] // *Antioxidants.* – 2022, № 11, 1763.

УДК 633.17:631.811.98

ПРОДУКТИВНОСТЬ ПРОСОВИДНЫХ КУЛЬТУР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НЕКОРНЕВОГО ВНЕСЕНИЯ ГУМИНОВЫХ УДОБРЕНИЙ

Корзун О. С., Самусик И. Д.

УО «Гродненский государственный аграрный университет»

г. Гродно, Республика Беларусь

***Аннотация.** Изучено влияние некорневого внесения Гидрогумата и Экстракта Сапропеля на продукционный процесс и урожайность пайзы и суданской травы.*