

Обзорная статья

УДК 631.46: 631.95:579.262

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-3-344-364>

БИОУДОБРЕНИЯ И АГЕНТЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ РИЗОСФЕРНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Н. В. Сырчина ^{1✉}, Л. В. Пилип ², Т. Я. Ашихмина ^{1,3}

¹ Вятский государственный университет

Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36

² Вятский государственный агротехнологический университет

Россия, 610017, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133

³ Институт биологии Коми научного центра УрО РАН

Россия, 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28

Поступила в редакцию 27.04.2025 г., после доработки 14.06.2025 г., принята 16.06.2025 г., опубликована 15.10.2025 г.

Аннотация. Ориентация на замену синтетических удобрений, регуляторов роста и средств защиты растений препаратами биологического происхождения позволяет снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, сохранить биологическое разнообразие и почвенное плодородие, замедлить истощение природных ресурсов. Особый интерес для создания коммерческих биопрепаратов (биоудобрений, биостимуляторов, агентов биологического контроля) представляют дружественные растениям ризосферные микроорганизмы (бактерии, грибы, водоросли). В статье представлен обзор научных публикаций, посвященных вопросам производства и применения биопрепаратов сельскохозяйственного назначения (инокулянтов) на основе способствующих росту растений бактерий (PGPR), грибов (PGPF) и эукариотических микроводорослей. По имеющимся оценкам, объем рынка биоудобрений в 2025 г. должен достигнуть \$ 2.83 млрд. Крупные компании, работающие на рынке биопрепаратов, акцентируют внимание на разработке инновационных продуктов, позволяющих повысить супрессивность и плодородие почв за счет улучшения микробного разнообразия, повышения доступности питательных веществ, подавления опасных фитопатогенов. Ведущей тенденцией последних десятилетий становится ориентация производителей на внедрение технологий генной инженерии, позволяющих адаптировать инокулянты к конкретным потребностям сельскохозяйственных культур, повысить их эффективность и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов, обеспечить успешную интеграцию с аборигенными микробными сообществами. К основным задачам в сфере биотехнологии, которые необходимо решить на современном этапе, следует отнести подтверждение качества биопродуктов, увеличение сроков хранения, гарантию эффективности, снижение себестоимости, обеспечение экологической и санитарной безопасности. Для обеспечения надлежащего качества биопрепаратов и гарантированного эффекта от их применения необходима разработка технологий производства больших количеств чистых (свободных от других микроорганизмов) инокулянтов с высоким потенциалом инфицирования.

Ключевые слова: ризосфера, биоудобрения, агенты биологического контроля, инокулянты, производство биоудобрений, грибы арбускулярной микоризы

✉ Для корреспонденции. Лаборатория биомониторинга Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук и Вятского государственного университета.

ORCID и e-mail адреса: Сырчина Надежда Викторовна: <https://orcid.org/0000-0001-9695-7146>, nvms1956@mail.ru; Пилип Лариса Валентиновна: <https://orcid.org/0000-0001-8049-6760>, pilip_larisa@mail.ru; Ашихмина Тамара Яковлевна: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0047>, ecolab2@gmail.com.

Соблюдение этических норм. Исследования проводили без использования животных и без привлечения людей в качестве испытуемых.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Биоудобрения и агенты биологического контроля на основе ризосферных микроорганизмов // Поволжский экологический журнал. 2025. № 3. С. 344 – 364. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-3-344-364>

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет ризосфера остается в центре внимания фундаментальной и прикладной науки. Лидирующее положение по количеству публикаций, посвященных ризосферным микроорганизмам (МО) и их использованию в сельском хозяйстве, занимают Индия, Китай, США, Пакистан (Espinosa-Palomeque et al., 2025). Фокус современных исследований направлен на поиск способов контроля над этой средой для улучшения здоровья и продуктивности растений (Minz, Ofek, 2011; Kondakova et al., 2024, 2025). Целенаправленное воздействие на ризосферу с целью формирования дружественной растениям микробиоты рассматривается в качестве наиболее перспективного механизма обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства, сохранения биоразнообразия и улучшения экологического состояния окружающей среды (ОС). Основные стратегии оптимизации взаимоотношений в системе почва – растение базируются на применении полезных для роста растений живых микроорганизмов – пробиотиков, продуктов жизнедеятельности пробиотических МО – постбиотиков, а также компонентов, способствующих активному развитию дружественной ризосферной микробиоты – пребиотиков. Композиции, содержащие в своем составе полезные МО и вещества, необходимые для их жизнедеятельности, получили название «синбиотики». К натуральным синбиотикам можно отнести навоз животных, помет птиц, осадки сточных вод (Vassileva et al., 2020). Существенным недостатком соответствующих материалов является высокий риск биологического и химического загрязнения ОС (Pilip et al., 2022; Syrchina et al., 2022, 2024; Kondakova et al., 2023). Микроорганизмы, проявляющие выраженные пробиотические свойства и пригодные для культивирования в искусственных условиях, используются в производстве биопрепаратов для повышения плодородия почвы и выращивания сельскохозяйственных культур экологически чистым способом. В настоящее время накоплен огромный массив экспериментальных данных о положительном влиянии ризосферных микробных сообществ на биодоступность макро- и микроэлементов, иммунитет, устойчивость растений к разнообразным заболеваниям и стрессам, включая стрессы, обусловленные глобальными климатическими изменениями. Применение полезных МО для повышения почвенного плодородия и урожайности активно продвигается в качестве альтернативного средства для смягчения вредного воздействия традиционных синтетических агрохимикатов на ОС (Backer et al., 2018; Chen et al., 2023; Lahlali et al., 2024). Создание условий для поддержания микробного разнообразия ризосферы признано ключевым фактором профилактики заболева-

ний растений и обеспечения здоровья экосистем (Berg et al., 2017). Ежегодно публикуются сотни работ, посвященных оценке пробиотического потенциала выделенных из ризосферы МО, однако лишь немногие полезные МО используются в производстве коммерческих биопрепаратов. Более активному внедрению научных достижений в практику, расширению объемов производства и обеспечению необходимого эффекта от применения биопрепаратов может способствовать повышение осведомленности населения о данной группе товаров.

Цель работы – систематизировать и обобщить опубликованную информацию о достижениях мировой науки и биотехнологии в области обеспечения плодородия почв, повышения урожайности и качества растениеводческой продукции за счет использования дружественных растениям ризосферных микроорганизмов.

Статья представляет собой обзор публикаций, посвященных вопросам производства и применения биопрепаратов сельскохозяйственного назначения на основе ризосферных МО (бактерий, грибов, водорослей). Основу обзора составляют статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях в период с 2000 по 2025 гг. Для поиска информации применяли сервисы Scopus, Google Scholar, Web of Science, Академия Google, КиберЛенинка, eLIBRARY, «Scholar.ru». Для систематизации массива опубликованных данных и группировки информационных источников использовали следующие ключевые слова и теги: ризосфера, ризосферные микроорганизмы, микробные комплексы ризосферы, биоудобрения, инокулянты, агенты биологического контроля, а также ключевые слова из публикаций аналогичной тематики. Ключевые слова применяли в русскоязычном и англоязычном вариантах с корректировкой смыслового значения терминов. Электронный поиск дополняли ручным поиском релевантной информации в монографиях, научных и отраслевых журналах, материалах конференций и других изданиях. Основное внимание в статье уделено таким вопросам, как состав ризосферного микробиома, способствующие росту растений ризобактерии, грибы, водоросли, производство, применение и проблемы контроля качества биопрепаратов на основе ризосферных МО.

Микробиота ризосферы

Ризосфера является одной из наиболее сложных и динамичных экологических систем, оказывающих непосредственное влияние на рост и продуктивность растений. Соответствующая система включает сообщества различных организмов (бактерий, грибов, вирусов, оомицетов, простейших, водорослей, нематод, микроартропод и др.), населяющих тонкий слой почвы (2 – 5 мм), прилегающий к поверхности корней и находящийся под влиянием корневых выделений (экссудатов). Для компонентов, входящих в состав ризосферы, характерна высокая степень связанности и интерактивности (Wallenstein, 2017). Между корнями и ризосферной биотой происходит активный обмен веществом и энергией. По имеющимся оценкам, на продуцирование экссудатов растения тратят до 20 – 30% связанного в процессе фотосинтеза углерода. Различные виды растений продуцируют различные экссудаты. Состав корневых выделений служит драйвером микробного разнообразия ризосферы. Благодаря генетически обусловленным механизмам хемотаксиса МО

обнаруживают и колонизируют молодые корни. Под влиянием экссудатов (углеводов, органических кислот, бензоксазиноидов, флавоноидов, терпенов, кумаринов, летучих органических соединений и др.) формируется уникальный ризосферный микробиом (РМ, ризобиом), который модулирует рост и здоровье растения-хозяина (Jones, Hinsinger, 2008; Prashar et al., 2014; Vries, Wallenstein, 2017; Pang, Xu, 2024).

Обитающие в ризосфере МО можно разделить на три основные группы: нейтральные для растений, вредные и полезные. Большинство связанных с растениями МО являются безвредными (нейтральными) комменсалами. Жизнедеятельность таких МО не оказывает заметного влияния на рост хозяина. Вредные (фитопатогенные) МО вырабатывают различные фитотоксины, оказывающие отрицательное влияние на растения. Например, штаммы *Bradyrhizobium* продуцируют ризобитоксин (ингибитор АЦК-синтазы – синтазы 1-аминоциклопропан-1-карбоновой кислоты), *Streptomyces toyacaenis* – габакулин (ингибитор биосинтеза хлорофилла), *Streptomyces sumanensis* – гостатин (ингибитор аминотрансферазы), *Streptomyces hygroscopicus* – биалафос (ингибитор глутаминсинтетазы), некоторые виды *Norcardia* и *Streptomyces* – тиолактомицин (ингибитор синтаз β-кетоацил-ацилпереносящих белков) (Duke, Dayan, 2011; Gusain, Bhandari, 2019). Полезные МО способствуют развитию растений за счет выработки фитогормонов, подавления вредных МО, разрушения фитотоксичных веществ и снижения фитопатогенной нагрузки, стимулирования полезной для растений биоты (например, микоризных грибов), улучшения питания растений, повышения стрессоустойчивости и иммунитета (Santoyo et al., 2016; Wani et al., 2016; Mondal, Sarkar, 2019). Благодаря ризобиому функциональные возможности растений значительно расширяются (Berlec, 2012; Ling et al., 2022). Разнообразие МО, жизнедеятельность которых связана с корнями растений, насчитывает десятки тысяч видов. Каждый грамм корня может содержать до 10¹¹ микробных клеток (Berendsen et al., 2012). Наиболее широко в ризосфере представлены бактерии и грибы. Самое высокое разнообразие МО наблюдается вблизи ризопланы (Dotaniya, Meena, 2015). Основными факторами, определяющими структуру микробиома, являются вид растения-хозяина, тип и состояние почвы (Garbeva et al., 2008). Загрязнение почв приводит к сокращению видового разнообразия МО (Pritchina et al., 2011). Заметное влияние на состав и численность РМ оказывают сезон, способ обработки почвы, характер севооборота, возраст растения, зона корня и др. Поскольку разные виды растений формируют различные бактериальные сообщества, повторное выращивание одних и тех же растений на одном и том же месте приводит к обогащению почвы специфичными для ризосферы данного вида растений МО («эффект ризосферы») (Smalla et al., 2001). Многочисленные исследования, выполненные в последние десятилетия, убедительно доказывают, что переход к устойчивому сельскому хозяйству и сохранение почвенного плодородия возможны только на основе формирования дружественной растениям почвенной микробиоты.

Растительные пробиотики

Растительные пробиотики (синонимы: биопрепараты, биоформулы, биоинокулянты, инокулянты) находят все более широкое применение для интродукции в

ризосферу с целью подавления фитопатогенов, улучшения питания, стрессоустойчивости, роста и здоровья растений. Инокулянты являются ключом к гармоничному балансу между урожайностью сельскохозяйственных культур и сохранением ОС. В настоящее время выявлено и изучено значительное количество МО, способствующих росту растений («Plant growth-promoting microorganisms» – PGPM). Соответствующие МО колонизируют ризосферу, проникают внутрь растительных тканей (эндофиты), населяют поверхность растений (эпифиты) или свободно живут в почве. Особый интерес для включения в состав биопрепаратов вызывают ризобактерии, способствующие росту и здоровью растений и не наносящие вреда растению-хозяину и ОС («Plant Growth-Promoting Rhizobacteria» – PGPR), а также дружественные растениям грибы и водоросли.

Способствующие росту растений бактерии. В группу PGPR включают штаммы, которые соответствуют по крайней мере двум из трех основных критериев: способность к агрессивной колонизации ризосферы, стимулирующее воздействие на рост растений, биоконтроль фитопатогенов (Kim, Anderson, 2018; Shilev et al., 2019). В зависимости от способа взаимодействия с растениями МО могут быть симбиотическими (*Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Bacillus*) или несимбиотическими (*Azotobacter*, *Azospirillum*) (Deng et al., 2020; Soumare et al., 2020). В зависимости от особенностей ризосферной ассоциации PGPR разделяют на две группы: внеклеточные, колонизирующие внешнюю поверхность корня, а именно ризосферу и ризоплану (ePGPR) и внутриклеточные, существующие внутри клеток корня (iPGPR). Внутриклеточные iPGPR приводят к образованию нового специализированного органа растения, называемого клубеньками (Gray, Smith, 2005). Микробы, колонизирующие внутренние ткани растений, в основном принадлежат к родам *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Flavobacterium*. Внесение PGPR в ризосферу обычно осуществляется путем инокуляции (заражения) полезными МО семян или корней растений. Штаммы МО для инокуляции подбирают в зависимости от решаемых задач: оптимизация минерального питания, стимулирование роста или защита от стрессов, патогенов, вредителей и т.п. Следует отметить, что все используемые в качестве инокулянтов МО полифункциональны, т.е. оказывают комплексное воздействие на растения. Кроме того, один и тот же род МО может содержать как полезные, так и вредные для растений виды. Разные штаммы одного вида могут существенно различаться по характеру продуцируемых метаболитов. В то же время представители различных таксонов могут оказывать сходное воздействие на растения и вызывать однотипные физиологические реакции. Яркий пример конвергентной эволюции представляет группа филогенетически неоднородных клубеньковых бактерий (ризобий), играющих важную роль в круговороте азота (Nagy, 2018). Неоднозначное влияние PGPR на растения существенно затрудняет возможность рациональной классификации биопрепаратов.

Способствующие росту растений грибы. Оказывающие положительное влияние на рост и устойчивость растений ризосферные грибы обозначают аббревиатурой PGPF – «Plant Growth-Promoting Fungi». Исключительные возможности некоторых PGPF обусловлены их способностью оптимизировать усвоение питательных веществ, стимулировать фотосинтез и выработку фитогормонов, изменять

экспрессию генов растений путем активации сигнальных путей, повышать толерантность к патогенам и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов (Singh et al., 2025). Благодаря грибам формируются дополнительные микрониши для МО – микоризосфера (зона влияния микоризы) и гифосфера (зона влияния свободного мицелия). Соответствующие микрониши, аналогично ризосфере, отличаются от общей массы почвы по количеству и структуре микробных сообществ и могут служить источником потенциальных агентов для создания биоудобрений, регуляторов роста и защитных препаратов (Voronina, Sidorova, 2017). Следует отметить, что понятие PGPF в значительной степени условно и неоднозначно. Гриб, способствующий росту одних видов растений, может не оказывать такого же влияния на рост других. Кроме того, характер воздействия грибов на растения может изменяться в зависимости от условий ОС и состояния самого растения. Согласно опубликованным данным, большинство настоящих грибов, характеризующихся как PGPF, относится к типу Ascomycota (*Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Colletotrichum*, *Exophiala*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Gliocladium*, *Phoma*, *Phomopsis*, *Purpureocillium* и *Talaromyces*); некоторые являются представителями Basidiomycota (*Limonomyces*, *Rhodotorula*, *Rhizoctonia*) и Zygomycota (*Mucor* и *Rhizopus*). *Fusariumoxysporum*, *Colletotrichum* и двуядерный *Rhizoctonia* филогенетически тесно связаны с фитопатогенами, но не имеют функциональных детерминант вирулентности для многих растений-хозяев, из которых их можно выделить, поэтому также включены в группу PGPF. К данной группе относят и колонизирующие корни непатогенные оомицеты *Pythium oligandrum* и *Phytophthora cryptogea*, действующие как PGPF (Hossain et al., 2017). Инокулянты, содержащие PGPF, находят все более широкое применение в растениеводстве. В настоящее время освоено производство биопрепаратов на основе грибов-эндифитов, относящихся к родам *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Penicillium*, *Aspergillus*, а также грибов подотдела Glomeromycota, образующих арбускулярную микоризу (AMF). Следует отметить, что AMF являются облигатными симбиотрофами, получающими органические соединения от растений, что существенно затрудняет возможности их культивирования и коммерческого использования (Sánchez-Gómez et al., 2025).

Полезные для растений микроводоросли. Исследования последних лет показали, что для производства биопрепаратов могут найти применение и обитающие в почве эукариотические микроводоросли (МВ). Представители этой группы способны выживать в условиях повышенного содержания ксенобиотиков, что представляет особый интерес для сельского хозяйства, широко использующего пестициды, минеральные удобрения, а также некоторые отходы производства (Win et al., 2018). В отличие от обитающих в ризосфере бактерий и грибов, создание биопрепаратов, содержащих живые МВ, является новым развивающимся направлением. Установлено, что МВ принимают активное участие в круговороте питательных веществ, вырабатывают биоактивные вещества, включая фитогормоны, поддерживают рост полезных бактерий и грибов, улучшают плодородие и повышают супрессивность почвы. Биостимулирующая активность МВ в основном обусловлена их первичными метаболитами: липидами, аминокислотами (аргинин, триптофан,

пролин), белками, полисахаридами (β -глюканами). Биомасса, накопленная МВ, может быть преобразована в доступные для других МО и растений питательные вещества. Опубликованы результаты исследований, согласно которым выделенная из ризосферы эукариотическая микроводоросль *Micractinium rhizosphaerae* sp. nov. способна эффективно связываться с тканями томата и синтезировать широкий спектр соединений, способствующих росту этого растения, включая фитогормоны (ИУК, салициловую, жасмоновую и абсцизовую кислоты) (Quintas-Nunes et al., 2023).

Биоудобрения, биостимуляторы и агенты биологического контроля

В зависимости от решаемых задач, биопрепараты подразделяют на биоудобрения (БУ) и агенты биологического контроля (АБК). Следует отметить, что до настоящего времени корректного и однозначного определения для соответствующих понятий не выработано, поскольку большинство инокулируемых в ризосферу МО выполняют функции и БУ и АБК. Биоудобрениями обычно называют препараты, содержащие живые МО, способствующие повышению плодородия почв путем обогащения ее доступными для растений элементами питания и/или стимулирования (регулирования) роста и развития растений за счет продуцирования фитогормонов. Микроорганизмы, продуцирующие регуляторы роста и не оказывающие заметного влияния на обеспечение растений элементами минерального питания, часто выделяют из группы БУ и позиционируют как биостимуляторы (БС) (Sun et al., 2024). Соответствующий подход создает определенные трудности в определении понятий «биоудобрение» и «биостимулятор». Для удобства регулирования рынка биопрепаратов БС классифицируются как БУ, однако с точки зрения воздействия продуцируемых ими метаболитов на растения, такой подход считается неправильным (Parađiković et al., 2019). Согласно (Yakhin et al., 2017), к БС следует относить сформулированный продукт биологического происхождения, улучшающий продуктивность растений вследствие новых или возникающих свойств комплекса компонентов, а не как единственное следствие наличия известных основных питательных веществ для растений, регуляторов роста растений или защитных соединений для растений.

Агенты биологического контроля представляют собой живые МО (включая вирусы), используемые для борьбы с вредными организмами (фитопатогенными грибами, бактериями, нематодами и др.). Механизмы защитного действия АБК реализуются за счет синтеза антибиотиков (феназина, пиолотеорина, пирролнитрина, бацилломицина, микосубтилина и др. (Wang et al., 2021)), сидерофоров (соединений, способствующих повышению подвижности железа – гидроксаматов, карбоксилатов, катехолатов и др. (Ghosh et al., 2020)), литических ферментов, разрушающих клеточные стенки МО (глюканаз, целлюлаз, хитиназ, протеаз, липаз и др.), или в результате конкуренции за питательные вещества и пространство. Биопрепараты на основе живых МО, используемые в качестве альтернативы синтетическим пестицидам, часто позиционируют как биопестициды (микробные пестициды) (Eilenberg et al., 2001; Bharti, Ibrahim, 2020; Stenberg et al., 2021; Fenibo et al., 2022; Hamrouni et al., 2025). Биопестициды действуют как антифиданты, аттрак-

танты, нематоды, фунгициды, репелленты вредителей, инсектициды и регуляторы роста (Sylvestre et al., 2023; Fusar Poli, Fontefrancesco, 2024).

Биоудобрения и АБК могут содержать один штамм или консорциумы полезных МО (Aloo et al., 2022). В рамках настоящей статьи при обсуждении вопросов, связанных с производством и применением продуктов сельскохозяйственного назначения, содержащих живые ризосферные МО, используются общие понятия – «биопрепараты» и «инокулянты», которые объединяют БУ, БС и АБК.

Эффективность биопрепаратов существенно зависит от климатических условий, а также содержания и доступности питательных веществ в почве. Исследования показывают, что бактериальная инокуляция оказывает более выраженное стимулирующее воздействие на рост растений в бедных питательными веществами почвах. Например, штаммы бактерий *Pseudomonas alcaligenes* PsA15, *Bacillus polymyxa* ВсР26 и *Mycobacterium phlei* MbP18 способны активно стимулировать рост кукурузы и усвоение N, P, K в дефицитной по содержанию этих элементов щелочной засоленной почве, при этом в относительно богатой суглинистой почве стимулирующий эффект снижается (Egamberdiyeva, 2007). В сухом климате за счет использования БУ урожайность может быть увеличена на $20.0 \pm 1.7\%$, в тропическом – на 14.9 ± 1.2 , в океаническом – на 10.0 ± 3.7 , в континентальном – только на $8.5 \pm 2.4\%$ (Schütz et al., 2018). По имеющимся оценкам, внедрение БУ в практику сельского хозяйства позволит повысить урожайность различных культур в среднем на 25% и сократить внесение минеральных удобрений до 50% (Demir et al., 2023). Присущая почве неоднородность является ключевым препятствием на пути поиска подходящей для жизнедеятельности инокулянтов ниши и успешной адаптации полезных МО к новым условиям. После внесения бактерий в почву их количество чаще всего быстро снижается, что препятствует достижению целевого эффекта. Решению данной проблемы способствует производство инокулянтов в оптимальной препаративной форме и соблюдение сроков и технологии их внесения. Именно эти факторы определяют потенциальный успех применения биопрепаратов. В научной литературе описано множество потенциально полезных штаммов, которые не появились на рынке из-за того, что для них не удалось разработать эффективную препаративную форму (Bashan et al., 2014).

Производство биопрепаратов

Коммерческий интерес к биопрепаратам на основе PGPM появился в конце XIX века, когда на рынок было выведено инновационное для того времени БУ «Нитрагин». В настоящее время ассортимент биопрепаратов и масштабы их производства быстро увеличиваются. Доминирующее положение на рынке занимают инокулянты на основе PGPR *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Azotobacter* и *Azospirillum*, а также PGPF, включающие роды *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Piriformospora*, *Penicillium*, *Phoma* и микоризообразующие виды *Glomus* (*Rhizophagus*), *Entrophospora*, *Acaulospora* и *Sclerocystis* (Bhattacharya et al., 2024). По имеющимся оценкам, в 2024 г. объем рынка БУ составил \$ 2.53 млрд, в 2025 г. он должен вырасти до \$ 2.83 млрд, к 2032 г. – до \$ 6.34 млрд при среднегодовом темпе роста 12.21% в период 2025 – 2032 г. Самая большая доля рынка принадлежит Северной

Америке (30.83% в 2024 г.), что обусловлено растущим спросом на органические продукты и поддержкой правительством США устойчивых методов ведения сельского хозяйства (Biofertilizers Market Size..., 2024). Поддержка производству и применению БУ оказывается в Китае (China's MARA, 2025), Индии (Bio fertilizer production..., 2019), Евросоюзе (Kurniawati et al., 2023), РФ (Korshunov, 2019) и других странах. Крупные компании акцентируют внимание на разработке биопродуктов, позволяющих повысить супрессивность и плодородие почв за счет оптимизации микробного разнообразия и улучшения доступности питательных веществ (What is covered..., 2025). Ведущей тенденцией последних десятилетий становится ориентация на внедрение технологий генной инженерии, позволяющих адаптировать биоинокулянты к конкретным потребностям сельскохозяйственных культур, повысить их эффективность и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов, обеспечить успешную интеграцию с аборигенными микробными сообществами. Свойства биопрепаратов во многом зависят от того, из каких биотопов был выделен исходный штамм. Недавние исследования показали, что инокулянты на основе местных штаммов имеют более высокий адаптационный потенциал. Например, устойчивые к дефициту влаги штаммы *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* были выделены из почв засушливых регионов (Ham et al., 2016; Kurniawati et al., 2023).

Несмотря на то что потенциально пригодные для применения в качестве инокулянтов МО обитают в природных экосистемах, обязательным условием их коммерческого использования является точная идентификация и объективная оценка патогенности и пробиотического потенциала. Соблюдение данных условий представляет серьезную проблему, обусловленную высокой генетической изменчивостью МО, затрудняющей поддержание стабильности коммерческих штаммов в условиях культивирования и хозяйственного использования (Bharti et al., 2017; Chakraborty, Akhtar, 2021; Yadav, Yadav, 2024). Как правило, обязательные испытания патогенности и биобезопасности RGPB не проводятся. В настоящее время не существует международных согласованных надежных протоколов для оценки безопасности штаммов МО, предназначенных для применения в растениеводстве в качестве инокулянтов. Вместе с тем, некоторые эндофитные RGPB могут вызывать заболевания человека или переносить гены антибиотикорезистентности. Различные роды бактерий, включая *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Herbaspirillum*, *Ochrobactrum*, *Pseudomonas*, *Ralstonia*, *Staphylococcus*, *Stenotrophomonas*, содержат штаммы, которые могут быть полезными для растений, но вредными для человека. К возбудителям заболеваний человека можно отнести такие характерные для ризосферы МО, как *Pseudomonas aeruginosa* и *Stenotrophomonas maltophilia* (внутрибольничные (нозокомиальные) инфекции); *Serratia marcescens*, *Burkholderia cepacia* и *Proteus vulgaris* (инфекции мочевыводящих путей, органов дыхания, ран); *Bacillus cereus* и *Pseudomonas* spp. (кожные и раневые инфекции), *Salmonella enterica* (кишечные инфекции), *Aspergillus* (аспергиллез) и др. (Berg et al., 2005; Kisluk, Yaron, 2012; Morrissey, 2025). Наиболее распространенные методы оценки безопасности включают биохимические исследования метаболитов, отбраковку штаммов, растущих при температуре человеческого тела (+36°C), выявление чувствительности штамма к антибиотикам, тестирование вирулентности на лабора-

торных животных, идентификацию патогенных генов методами секвенирования (Tariq et al., 2022).

Каждый тип биоудобрения готовится путем выделения эффективного микробного штамма, его выращивания в искусственных условиях на определенных субстратах (питательных средах), масштабирования и формулирования (биоформулирования) с использованием твердой или жидкой основы (формулированием в англоязычной литературе называют объединение МО, основы и добавок, а готовый биопрепарат называют «формулой» или «биоформулой»). Правильное формулирование должно обеспечивать простоту обращения и применения биопродукта, хорошую рентабельность, стабильный микробиологический состав и жизнеспособность МО в течение заявленного срока хранения (Çakmakçı, 2019). Разработка методов производства больших количеств чистых (свободных от других МО) инокулянтов с высоким потенциалом инфицирования является основной проблемой, которую необходимо решить, чтобы обеспечить надлежащее качество БУ и гарантированный эффект от их применения (Malusá et al., 2012). В настоящее время качество коммерческих инокулянтов, выпускаемых многими производителями, остается на низком уровне, что не позволяет получить заявленный эффект и дискредитирует саму идею перехода к устойчивому сельскохозяйственному производству за счет частичной или полной замены химических удобрений биологическими. Многие биопрепараты содержат слишком низкое для успешной колонизации ризосферы число полезных МО, кроме того, препараты бывают загрязнены посторонней микробиотой, включающей условно-патогенные виды (Mishra, Barolia, 2020; Ullah et al., 2023). В качестве примера можно привести данные исследований 13 коммерческих БУ, проведенных в Индии. Согласно полученным результатам, только в 5 препаратах были обнаружены все или некоторые МО, указанные на этикетке, в 8 продуктах состав МО полностью не соответствовал заявленному (Raimi et al., 2020). Следует отметить, что большинство инокулянтов снижают жизнеспособность при длительном хранении и под воздействием неблагоприятных условий ОС. Для обеспечения устойчивости МО в составе биопрепаратов применяют такие передовые технологии, как лиофилизация (сублимационная сушка), сушка в псевдооживленном слое, инкапсулирование и др. Лيوфилизация сохраняет жизнеспособность МО за счет быстрого замораживания образца и удаления образующегося льда путем сублимации. Быстрая сушка в псевдооживленном слое повышает выживаемость и стрессоустойчивость МО, обеспечивает более высокую чистоту готовой формы. При инкапсулировании небольшие частицы активного агента (бактерий, клеток грибов, гифальных сегментов) полностью или частично покрываются защитной оболочкой. В результате образуются нано- (1 – 100 нм) или микро- (100 нм – 1000 мкм) капсулы. Оболочка защищает МО от воздействия вредных факторов и повышает их выживаемость. Например, срок хранения инкапсулированной хитозаном культуры *Pseudomonas fluorescens* (7×10^{10} КОЕ/мл) достигал 10 месяцев (Isabel et al., 2024). При внесении в почву капсулирующий состав постепенно разрушается и МО начинают развиваться в новой среде. Чаще всего для создания защитных оболочек используют натуральные или синтетические полимеры, а также другие компоненты, способствующие сохранению жизне-

способности МО, обеспечивающие необходимую форму и прочность гранул, а также оптимальную скорость деградации и высвобождения МО в почве (Sahu et al., 2018; Kaur et al., 2023; Fadji et al., 2024).

В качестве носителей для бактериальных инокулянтов используют различные минералы, торф, растительные остатки, натуральные и синтетические полимеры, уголь и др. Носитель должен быть дешевым, доступным, пригодным для стерилизации, химически и физически однородным, обладать хорошей влагоудерживающей способностью и, по возможности, быть пригодным для большого числа видов или штаммов МО. Согласно опубликованным данным, рисовая солома, пшеничные и рисовые отруби, жом широко используют в производстве биоудобрений на основе *Rhizobium*, *Burkholderia*, *Bacillus*; инертные материалы (вермикулит, альгинат, перлит, фосфатная руда, полиакриламидные гели) – для биоудобрений на основе *Rhizobium*, *Azospirillum lipoferum*, *Bacillus megaterium* и *Pseudomonas*. Хорошим носителем для большинства МО является торф (Yakanto, Shutsrirung, 2017; Kaur, Kaur, 2023). Для создания биопродуктов в твердой форме используют твердые носители, для жидкой или пастообразной формы – жидкие.

Современные технологии позволяют увеличить срок годности жидких биопрепаратов до 15 – 24 месяцев, твердых – до 8 – 12 месяцев. Более короткий срок хранения твердых форм в основном обусловлен гибелью МО из-за обезвоживания. Жидкие формы более устойчивы к воздействию повышенных температур (до 45°C), имеют более низкий уровень загрязнения и более высокое содержание полезных МО ($>10^8$ КОЕ/мл), удобны в использовании и экономичны в производстве (John et al., 2011; Dey, 2021). Для производства жидких форм используют питательные бульоны, воду, растительные и минеральные масла, эмульсии типа «масло в воде», загустители (крахмал, гуммиарабик, КМЦ и др.), защитные агенты (диметилсульфоксид, глицерин, поливинилпирролидон) и другие компоненты. В качестве стабилизаторов суспензий и эмульсий применяют поверхностно-активные вещества (до 3 – 8% от массы удобрения). Обязательным компонентом жидких биоформул являются защитные добавки, способствующие образованию цист и спящих спор. В жидкой форме производят препараты, содержащие *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Acetobacter*, фосфат и калий мобилизующие бактерии (*Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Frateruria aurentia*) и др. Качественный биопрепарат должен содержать до 10^7 – 10^8 и более жизнеспособных клеток, или КОЕ/г. Примеси недопустимы при разведении до 10^{-5} – 10^{-6} (Mohod et al., 2015; Raimi et al., 2021; Allouzi et al., 2022; Jaiswal et al., 2023). Твердые биопрепараты выпускают в форме гранул, микрогранул, порошков, смачиваемых порошков, вододиспергируемых гранул. Такие препараты характеризуются химической стабильностью, их удобно транспортировать, хранить и смешивать с сыпучими материалами (Miranda et al., 2024).

Исследования последних лет показали, что значительные перспективы для повышения эффективности биопрепаратов и снижения экологического давления на экосистемы открывают нанотехнологии (Saber-Rise, Moradi-Pour, 2020). Наноразмерные частицы легко поглощаются корнями и листьями растений и усваиваются более эффективно. Инновационные нанобиоудобрения состоят из наномате-

риалов, связанных с полезными МО (например, бактериальные клетки, прикрепленные к поверхности наночастиц). Приготовление нанобиодобрений включает три основных этапа: подготовку микробной культуры, инкапсулирование МО с наночастицами и тестирование эффективности, качества и срока годности (Patel et al., 2023).

В качестве примера нанобиодобрения можно привести состав, содержащий бактерии *Pseudomonas* sp. DN18, заключенные в альгинатные шарики с добавкой салициловой кислоты, наночастиц оксида цинка, азота и фосфора (ZnONP). Испытания показали, что данный состав проявлял более выраженный фунгицидный эффект (подавлял *Sclerotium rolfii*) и оказывал более выраженное стимулирующее воздействие на рост растений, чем препараты содержащие свободные бактерии (Panichikkal et al., 2021).

Отдельную группу биопрепаратов составляют препараты, содержащие AMF. Технология производства биопрепаратов на основе AMF существенно отличается от технологии производства биопрепаратов на основе других МО. Поскольку AMF являются облигатными симбионтами, они не могут культивироваться в чистых культурах, изолированно от растений-хозяев. Эта особенность существенно затрудняет крупномасштабное производство AMF для сельского хозяйства, ограничивает объемы их выпуска и затрудняет обеспечение надлежащего качества. Низкое качество является главной проблемой данной группы биопрепаратов. Независимая оценка коммерческих AMF-инокулянтов, выпускаемых в Европе, Австралии и Северной Америке, показала, что в нестерилизованной почве их применение не привело к усилению микоризной колонизации. Инокуляция увеличила биомассу растений только в 1 случае из 25. В стерилизованной почве не вызвали колонизацию корней 84% инокулянтов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что изученные коммерческие формы биопрепаратов не содержали достаточного количества жизнеспособных пропагул (Salomon, Demarmels et al., 2022). Аналогичные результаты были получены и в ряде других исследований, то есть неэффективные коммерческие AMF-инокулянты пока являются обычным явлением, а не исключением. Часто в состав инокулянтов, заявляемых производителями как AMF, включают другие полезные МО, а также биологически активные и/или питательные вещества. Положительное действие соответствующих добавок может быть ложно приписано результату воздействия AMF (Salomon et al., 2022). В настоящее время Европейский комитет по стандартизации CEN TC 455 «Биостимуляторы растений» устанавливает стандартные методы сертификации AMF-инокулянтов. Основное внимание в этих методах уделяется количественной оценке жизнеспособных МО в коммерческих продуктах и подтверждению заявленных преимуществ с помощью стандартизированных испытаний (например, повышенное усвоение питательных веществ, устойчивость к абиотическому стрессу и стимулирование роста растений) (CEN/TC, 2019).

В последние годы фокус прикладных исследований направлен на технологические аспекты производства и применения эффективных AMF-инокулянтов. Для инокуляции обычно используют почву из корневой зоны растений-хозяев, содержащую колонизированные фрагменты корней, споры AMF и гифы; сырые иноку-

лянты (совместно выращенные в инертной среде изолянты AMF и растение-хозяин) или зараженные фрагменты корней растения-хозяина, которые могут служить источником инокулята. Необходимость совместного культивирования AMF с растением-хозяином требует не только значительного времени и пространства, но и затрудняет создание референтных коллекций AMF. Не менее сложную проблему представляет выделение чистой культуры и оценка уровня колонизации корней растения-хозяина соответствующими грибами (Berruti et al., 2016; Kumar, Dubey, 2020; Anand et al., 2022). Для крупномасштабного асептического производства AMF-препаратов *in vitro* используют специальные биореакторы, позволяющие выращивать AMF-споры в волосатом корне растения, трансформированного с помощью Т-ДНК из плазмиды *Agrobacterium rhizogenes*. Биореактор включает распылительное устройство, систему инокуляции, культуральную сетку и рециркуляцию питательных веществ, обеспечивает оптимальное распределение кислорода, минимизирует сдвиговое повреждение чувствительных трансформированных корней, что приводит к получению высококачественных, незагрязненных спор AMF. Совершенствование конструкций биореакторов обещает повысить рентабельность и масштабируемость производства, а также качество AMF биопрепаратов (Ghorui et al., 2025).

Более 90% коммерческих продуктов, содержащих AMF, выпускается в твердой форме и около 10% – в жидкой. Наиболее активно для производства инокулянтов используют *Rhizophagus irregularis* (39%), *Funneliformis mosseae* (21%) и *Claroideoglomus etunicatum* (16%). Повышению эффективности AMF-препаратов способствует применение стриголактонов, а также низких доз флавоноа хризина и флавонолов кверцетина и рутина, которые в качестве пресимбиотических сигнальных молекул стимулируют прорастание спор и облегчают колонизацию корней (Vurro et al., 2016; Lidoy et al., 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ориентация на частичную или полную замену синтетических агрохимикатов продуктами биологического происхождения, содержащими дружественные растениям живые МО, является важным фактором экологизации земледелия. Экологически безопасные биопрепараты на основе PGPM способствуют улучшению минерального питания, снижению фитопатогенной нагрузки, повышению стрессоустойчивости растений. В научной литературе описаны сотни эффективных штаммов МО (бактерий, грибов, водорослей) потенциально пригодных для создания экологически безопасных биоудобрений, регуляторов (стимуляторов) роста, АБК, однако лишь немногие из этих МО применяются в производстве коммерческих инокулянтов, что в значительной степени обусловлено несовершенством биотехнологических процессов массового производства ценных штаммов, низкой выживаемостью полезных МО в период хранения и внесения биопрепаратов, недостаточным адаптационным потенциалом инокулянтов к новым условиям. Особые сложности возникают при производстве инокулянтов на основе АБК.

К числу важнейших задач, которые необходимо решить производителям коммерческих биопрепаратов, на современном этапе следует отнести внедрение си-

стемы обеспечения надлежащего качества соответствующих товаров, а также их санитарной и экологической безопасности. Особую остроту данная задача приобретает в условиях активного внедрения в практику нанотехнологий и технологий генной инженерии, существенно изменяющих естественные свойства МО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Allouzi M. M. A., Allouzi S. M. A., Keng Z. X., Supramaniam C. V., Singh A., Chong S. Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. *Heliyon*, 2022, vol. 8, iss. 12, article no. e12609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12609>
- Aloo B. N., Tripathi V., Makumba B. A., Mbega E. R. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, article no. 1002448. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002448>
- Anand K., Pandey G. K., Kaur T., Pericak O., Yadav A. N. Arbuscular mycorrhizal fungi as a potential biofertilizers for agricultural sustainability. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 2022, vol. 10, suppl. 1, pp. 90–107. <https://doi.org/10.7324/JABB.2022.10s111>
- Backer R., Rokem J. S., Ilangumaran G., Lamont J., Smith D. L. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 2018, vol. 9, pp. 1473–1481. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bashan Y., de-Bashan L. E., Prabhu S. R., Hernandez J. P. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, 2014, vol. 378, pp. 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>
- Berendsen R. L., Pieterse C. M. J., Bakker P. A. H. M. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 2012, vol. 17, iss. 8, pp. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Berg G., Eberl L., Hartmann A. The rhizosphere as a reservoir for opportunistic human pathogenic bacteria. *Environmental Microbiology*, 2005, vol. 7, iss. 11, pp. 1673–1685. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00891.x>
- Berg G., Köberl M., Rybakova D., Müller H., Grosch R., Smalla K. Plant microbial diversity is suggested as the key to future biocontrol and health trends. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, vol. 93, iss. 5, article no. fix050. <https://doi.org/10.1093/femsec/fix050>
- Berlec A. Novel techniques and findings in the study of plant microbiota: Search for plant probiotics. *Plant Science*, 2012, vol. 193–194, pp. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.05.010>
- Berruti A., Lumini E., Balestrini R., Bianciotto V. Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: Let's benefit from past successes. *Frontiers in Microbiology*, 2016, vol. 6, article no. 1559. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- Bharti N., Sharma S. K., Saini S., Verma A., Nimonkar Y., Prakash O. Microbial plant probiotics: Problems in application and formulation. In: *Probiotics and Plant Health*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2017, pp. 317–335. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3473-2_13
- Bharti V., Ibrahim S. Biopesticides: Production, formulation and application systems. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2020, vol. 9, iss. 10, pp. 3931–3946. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.453>
- Bhattacharya A., Mishra P., Mishra I., Arora P., Arora N. K. Microbe-based biostimulants: Latest developments and future perspectives. *Microbial Biotechnology for Sustainable Agriculture*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2024, vol. 2, pp. 29–54.
- Bio fertilizer production and marketing. *MIT Mega Food Park*. Odisha, India, 2019. Available at: http://mitsmegafoodpark.com/mobile/documents/project_report/Bio%20Fertilizer%20Production%20and%20marketing.pdf (accessed April 7, 2025).

Biofertilizers Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Nitrogen Fixing, Phosphate Solubilizers, and Others), By Microorganism (Rhizobium, Azotobacter, Azospirillum, Pseudomonas, Bacillus, VAN, and Others), By Application (Seed Treatment, Soil Treatment, and Others), By Crop Type (Cereals, Pulses & Oilseeds, Fruits & Vegetables, and Others), and Regional Forecast, 2025–2032. Fortune Business Insights. Pune, India, 2024. 249 p. Available at: <http://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biofertilizers-market-100413> (accessed April 7, 2025).

Çakmakçı R. A review of biological fertilizers current use, new approaches, and future perspectives. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology*, 2019, vol. 5, no. 7, pp. 83–92.

CEN/TC 455 “Plant Biostimulants”, 2019. Available at: <http://fertilgest.imagelinenetwork.com/sitocommon/UserFiles/Image/biostimolanti-conference2020/session1/01-Benoit-Planques-Presentation-CEN-TC-455-Bari.pdf> (accessed April 7, 2025).

Chakraborty T., Akhtar N. Biofertilizers: Prospects and challenges for future. In: *Biofertilizers: Study and Impact*. Beverly, Scrivener Publishing, 2021, pp. 575–590. <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch20>

Chen W., Modi D., Picot A. Soil and phytomicrobiome for plant disease suppression and management under climate change: A review. *Plants*, 2023, vol. 12, no. 14, article no. 2736. <https://doi.org/10.3390/plants12142736>

China’s MARA to Streamline Approval and Promote High-Efficiency Bio-Pesticides. Available at: <http://www.reach24h.com/en/news/industry-news/agrochemical/chinas-mara-to-streamline-approval-and-promote-high-efficiency-bio-pesticides.html> (accessed April 7, 2025).

Demir H., Sönmez İ., Uçan U., Akgün İ. H. Biofertilizers improve the plant growth, yield, and mineral concentration of lettuce and broccoli. *Agronomy*, 2023, vol. 13, no. 8, article no. 2031. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082031>

Deng Z. S., Kong Z. Y., Zhang B. C., Zhao L. F. Insights into non-symbiotic plant growth promotion bacteria associated with nodules of *Sphaerophysa salsula* growing in northwestern China. *Archives of Microbiology*, 2020, vol. 202, pp. 399–409. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01752-7>

Dey A. Liquid biofertilizers and their applications: an overview. In: *Environmental and Agricultural Microbiology: Applications for Sustainability*. Beverly, Scrivener Publishing LLC, 2021, pp. 275–292. <https://doi.org/10.1002/9781119525899>

Dotaniya M. L., Meena V. D. Rhizosphere effect on nutrient availability in soil and its uptake by plants: A review. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2015, vol. 85, iss. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0297-0>

Duke S. O., Dayan F. E. Modes of action of microbially-produced phytotoxins. *Toxins*, 2011, vol. 3, no. 8, pp. 1038–1064. <https://doi.org/10.3390/toxins3081038>

Egamberdiyeva D. The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils. *Applied Soil Ecology*, 2007, vol. 36, iss. 2–3, pp. 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.02.005>

Eilenberg J., Hajek A., Lomer C. Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl*, 2001, vol. 46, iss. 4, pp. 387–400. <https://doi.org/10.1023/A:1014193329979>

Espinosa-Palomeque B., Jiménez-Pérez O., Ramírez-Gottfried R. I., Preciado-Rangel P., Rivas-García T. Biocontrol of phytopathogens using plant growth promoting Rhizobacteria: Bibliometric analysis and systematic review. *Horticulturae*, 2025, vol. 11, no. 3, pp. 271–280. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030271>

Fadiji A. E., Xiong C., Egidi E., Singh B. K. Formulation challenges associated with microbial biofertilizers in sustainable agriculture and paths forward. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 2024, vol. 3, iss. 3, article no. e70006. <https://doi.org/10.1002/sae2.70006>

Fenibo E. O., Ijoma G. N., Matambo T. Biopesticides in sustainable agriculture: Current status and future prospects. In: *New and Future Development in Biopesticide Research: Biotechnological Exploration*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2022, pp. 1–53. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3989-0_1

Fusar Poli E., Fontefrancesco M. F. Trends in the implementation of biopesticides in the Euro-Mediterranean region: A narrative literary review. *Sustainable Earth Reviews*, 2024, vol. 7, iss. 1, article no. 14. <https://doi.org/10.1186/s42055-024-00085-8>

Garbeva P., Van Elsas J. D., Van Veen J. A. Rhizosphere microbial community and its response to plant species and soil history. *Plant and Soil*, 2008, vol. 302, pp. 19–32. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9432-0>

Ghorui M., Chowdhury S., Burla S. Recent advances in the commercial formulation of arbuscular mycorrhizal inoculants. *Frontiers in Industrial Microbiology*, 2025, vol. 3, article no. 1553472. <https://doi.org/10.3389/finmi.2025.1553472>

Ghosh S. K., Bera T., Chakrabarty A. M. Microbial siderophore – A boon to agricultural sciences. *Biological Control*, 2020, vol. 144, article no. 104214. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104214>

Gray E. J., Smith D. L. Intracellular and extracellular PGPR: Commonalities and distinctions in the plant–bacterium signaling processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, vol. 37, iss. 3, pp. 395–412. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.030>

Gusain P., Bhandari B. S. Rhizosphere associated PGPR functioning. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2019, vol. 8, iss. 5, pp. 1181–1191.

Ham R., O’Callaghan M., Geurts R., Ridgway H. J., Ballard R., Noble A., Wakelin S. A. Soil moisture deficit selects for desiccation tolerant *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii*. *Applied Soil Ecology*, 2016, vol. 108, pp. 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.09.016>

Hamrouni R., Regus F., Farnet Da Silva A. M., Orsiere T., Hamrouni R. Current status and future trends of microbial and nematode-based biopesticides for biocontrol of crop pathogens. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2025, vol. 45, iss. 2, pp. 333–352. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2370370>

Hossain M. M., Sultana F., Islam S. Plant growth-promoting fungi (PGPF): Phytostimulation and induced systemic resistance. In: *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2017, vol. 2, pp. 135–191. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_6

Isabel J. B., Balamurugan A., Devi P. R., Periyasamy S. Chitosan-encapsulated microbial biofertilizer: A breakthrough for enhanced tomato crop productivity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, vol. 260, article no. 129462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129462>

Jaiswal A., Kumari G., Upadhyay V. K., Pradhan J., Pramanik H. S. K. A methodology to develop liquid formulation of biofertilizer technology. *The Pharma Innovation Journal*, 2023, vol. 12, no. 11, pp. 875–881.

John R. P., Tyag R. D., Brar S. K., Surampalli R. Y., Prévost D. Bio-encapsulation of microbial cells for targeted agricultural delivery. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, vol. 31, iss. 3, pp. 211–226. <https://doi.org/10.3109/07388551.2019.513327>

Jones D. L., Hinsinger P. The rhizosphere: Complex by design. *Plant and Soil*, 2008, vol. 312, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9774-2>

Kaur R., Kaur S. Carrier-Based Biofertilizers. In: *Metabolomics, Proteomes and Gene Editing Approaches in Biofertilizer Industry*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2023, pp. 57–75.

Kaur R., Kaur S., Dwibedi V., Kaur C., Akhtar N., Alzahrani A. Development and characterization of rice bran-gum Arabic based encapsulated biofertilizer for enhanced shelf life and con-

trolled bacterial release. *Frontiers in Microbiology*, 2023, vol. 14, article no. 1267730. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1267730>

Kim Y. C., Anderson A. J. Rhizosphere pseudomonads as probiotics improving plant health. *Molecular Plant Pathology*, 2018, vol. 19, iss. 10, pp. 2349–2359. <https://doi.org/10.1111/mpp.12693>

Kisluk G., Yaron S. Presence and persistence of *Salmonella enterica* serotype typhimurium in the phyllosphere and rhizosphere of spray-irrigated parsley. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, vol. 78, iss. 11, pp. 4030–4036. <https://doi.org/10.1128/AEM.00087-12>

Kondakova L. V., Syrchina N. V., Kondakova I. A. Soil algocyanoflora specificity under anthropogenic pressure. *Theoretical and Applied Ecology*, 2025, no. 1, pp. 202–209 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-4-202-209>

Kondakova L. V., Syrchina N. V., Kondakova I. A. The ground sulphur effect on algocyanoflora of alkali-saline soil. *Theoretical and Applied Ecology*, 2024, no. 1, pp. 131–140 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-1-131-140>

Kondakova L. V., Syrchina N. V., Pilip L. V., Kondakova I. A. Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms. *Theoretical and Applied Ecology*, 2023, no. 2, pp. 190–197 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-2-190-197>

Korshunov S. New contexts of organic agriculture. *Agrarian Science*, 2019, no. 3, pp. 10–11 (in Russian).

Kumar P., Dubey K. K. Biotechnological interventions for arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) based biofertilizer: Technological perspectives. In: *Microbial Enzymes and Biotechniques: Interdisciplinary Perspectives*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020, pp. 161–191. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6895-4_9

Kurniawati A., Stankovics P., Hilmi Y. S., Toth G., Smol M., Toth Z. Understanding the future of bio-based fertilisers: The EU's policy and implementation. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2023, vol. 3, article no. 100033. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100033>

Lahlali R., Taoussi M., Laasli S. E., Gachara G., Barka E. A. Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. *Crop and Environment*, 2024, vol. 3, iss. 3, pp. 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003>

Lidoy J., Berrio E., García M., España-Luque L., Pozo M. & López-Ráez J. A. Flavonoids promote *Rhizophagus irregularis* spore germination and tomato root colonization: A target for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 2023, vol. 13, article no. 1094194. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1094194>

Ling N., Wang T., Kuzyakov Y. Rhizosphere bacteriome structure and functions. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, no. 1, article no. 836. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28448-9>

Malusá E., Sas-Paszt L., Ciesielska J. Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *The Scientific World Journal*, 2012, vol. 2012, no. 1, article no. 491206. <https://doi.org/10.1100/2012/491206>

Minz D., Ofek M. Rhizosphere microorganisms. In: *Beneficial Microorganisms in Multicellular Life Forms*. Berlin, Springer-Verlag, 2011, pp. 105–121. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21680-0_7

Miranda A. M., Hernandez-Tenorio F., Villalta F., Vargas G. J., Sáez A. A. Advances in the development of biofertilizers and biostimulants from microalgae. *Biology*, 2024, vol. 13, no. 3, article no. 199. <https://doi.org/10.3390/biology13030199>

Mishra B. K., Barolia S. K. Quality assessment of microbial inoculants as biofertilizer. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2020, vol. 9, no. 10, pp. 3715–3729. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.428>

Mohod S., Lakhawat G. P., Deshmukh S. K., Ugwekar R. P. Production of liquid biofertilizers and its quality control. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 2015, vol. 2, iss. 2, pp. 158–165.

Mondal S., Sarkar S. Role of plant growth promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: A review. *Journal Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2019, vol. 8, pp. 2821–2831.

Morrissey C. O. Diagnosis and management of invasive fungal infections due to non-*Aspergillus* moulds. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2025, vol. 80, suppl. 1, pp. 117–139. <https://doi.org/10.1093/jac/dkaf005>

Nagy L. G. Many roads to convergence. *Science*, 2018, vol. 361, no. 6398, pp. 125–126. <https://doi.org/10.1126/science.aau2409>

Pang Z., Xu P. Probiotic model for studying rhizosphere interactions of root exudates and the functional microbiome. *The ISME Journal*, 2024, vol. 18, no. 1, article no. 223. <https://doi.org/10.1093/ismej/wrae223>

Panichikhal J., Prathap G., Nair R. A., Krishnankutty R. E. Evaluation of plant probiotic performance of *Pseudomonas* sp. encapsulated in alginate supplemented with salicylic acid and zinc oxide nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, vol. 166, pp. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.110>

Paradić N., Teklić T., Zeljković S., Lisjak M., Špoljarević M. Biostimulants research in some horticultural plant species – A review. *Food Energy Security*, 2019, vol. 8, iss. 2, article no. e00162. <https://doi.org/10.1002/fes3.162>

Patel C., Singh J., Karunakaran A., Ramakrishna W. Evolution of nano-biofertilizer as a green technology for agriculture. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 10, article no. 1865. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101865>

Pilip L. V., Syrchina N. V., Kozvonin V. A., Kolevatykh E. P., Ashikhmina T. Ya., Sazonov A. V. Biological contamination of arable land with pig waste. *Theoretical and Applied Ecology*, 2022, no. 3, pp. 199–205 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-199-205>

Prashar P., Kapoor N., Sachdeva S. Rhizosphere: Its structure, bacterial diversity and significance. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2014, vol. 13, iss. 1, pp. 63–77. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9317-z>

Pritchina O., Ely C., Smets B. F. Effects of PAH-contaminated soil on rhizosphere microbial communities. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, vol. 222, pp. 17–25. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0800-2>

Quintas-Nunes F., Brandão P. R., Barreto Crespo M. T., Glick B. R., Nascimento F. X. Plant growth promotion, phytohormone production and genomics of the rhizosphere-associated microalga, *Micractinium rhizosphaerae* sp. nov. *Plants*, 2023, vol. 12, no. 3, article no. 651. <https://doi.org/10.3390/plants12030651>

Raimi A., Roopnarain A., Adeleke R. Biofertilizer production in Africa: Current status, factors impeding adoption and strategies for success. *Scientific African*, 2021, vol. 11, article no. e00694. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00694>

Raimi A., Roopnarain A., Chirima G. J., Adeleke R. Insights into the microbial composition and potential efficiency of selected commercial biofertilisers. *Heliyon*, 2020, vol. 6, iss. 7, article no. 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04342>

Saberi-Rise R., Moradi-Pour M. The effect of *Bacillus subtilis* Vru1 encapsulated in alginate-Bentonite coating enriched with titanium nanoparticles against *Rhizoctonia solani* on bean. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 152, pp. 1089–1097. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.197>

Sahu P. K., Gupta A., Singh M., Mehrotra P., Brahmaprakash G. P. Bioformulation and fluid bed drying: A new approach towards an improved biofertilizer formulation. In: *Eco-friendly Agro-biological Techniques for Enhancing Crop Productivity*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018, pp. 47–62. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6934-5_3

Salomon M. J., Demarmels R., Watts-Williams S. J., McLaughlin M. J., Kafle A., Ketelsen C., van der Heijden M. G. Global evaluation of commercial arbuscular mycorrhizal inoculants under

greenhouse and field conditions. *Applied Soil Ecology*, 2022, vol. 169, article no. 104225. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104225>

Salomon M. J., Watts-Williams S. J., McLaughlin M. J., Bücking H., Singh B. K., Hutter I., van der Heijden M. G. Establishing a quality management framework for commercial inoculants containing arbuscular mycorrhizal fungi. *iScience*, 2022, vol. 25, iss. 7, article no. 104636. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104636>

Sánchez-Gómez T., Santamaría Ó., Martín-García J. & Poveda J. Fungal metabolites as plant growth promoters in crops. In: *Fungal Metabolites for Agricultural Applications: Biostimulation and Crop Protection by Fungal Biotechnology*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 59–84. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76587-2_4

Santoyo G., Moreno-Hagelsieb G., del Carmen Orozco-Mosqueda M., Glick B. R. Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research*, 2016, vol. 183, pp. 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>

Schütz L., Gattinger A., Meier M., Müller A., Bollert T., Mäder P., Mathimaran N. Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization – A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 2018, vol. 8, article no. 2204. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>

Shilev S., Azaizeh H., Vassilev N., Georgiev D., Babrikova I. Interactions in soil-microbe-plant system: Adaptation to stressed agriculture. In: *Microbial Interventions in Agriculture and Environment. Vol. 1: Research Trends, Priorities and Prospects*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019, pp. 131–171. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8391-5_6

Singh B., Tripathi S., Tyagi S., Tripathi A., Dubey P., Kumar S. Phytostimulation and induction of systemic resistance by plant growth promoting fungi. In: *Plant Microbiome and Biological Control: Emerging Trends and Applications*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 221–238. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-75845-4>

Smalla K., Wieland G., Buchner A., Zock A., Parzy J., Kaiser S., Roskot N., Heuer H., Berg G. Bulk and rhizosphere soil bacterial communities studied by denaturing gradient gel electrophoresis: Plant-dependent enrichment and seasonal shifts revealed. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, vol. 67, no. 10, pp. 4742–4751. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.10.4742-4751.2001>

Soumare A., Diedhiou A. G., Thuita M., Hafidi M., Kouisni L. Exploiting biological nitrogen fixation: a route towards a sustainable agriculture. *Plants*, 2020, vol. 9, no. 8, article no. 1011. <https://doi.org/10.3390/plants9081011>

Stenberg J. A., Sundh I., Becher P. G., Björkman C., Viketoft M. When is it biological control? A framework of definitions, mechanisms, and classifications. *Journal of Pest Science*, 2021, vol. 94, iss. 3, pp. 665–676. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01354-7>

Sun W., Shahrajabian M. H., Soleymani A. The roles of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) – Based biostimulants for agricultural production systems. *Plants*, 2024, no. 13, article no. 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>

Sylvestre M. N., Adou A. I., Brudey A., Sylvestre M., Pruneau L., Gaspard S., Cebrian-Torrejón G. Plant-derived pesticides (Alternative approaches to pesticide use). In: *Biodiversity, Functional Ecosystems and Sustainable Food Production*. Cham, Springer International Publ., 2023, pp. 141–182. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07434-9_5

Syrchina N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste. *Theoretical and Applied Ecology*, 2022, no. 3, pp. 219–225 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>

Syrchina N. V., Pilip L. V., Kolevatykh E. P., Ashikhmina T. Ya. Biological contamination of soils by livestock by-products. *Theoretical and Applied Ecology*, 2024, no. 2, pp. 201–210 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-2-201-210>

Tariq M., Jameel F., Ijaz U., Abdullah M. Biofertilizer microorganisms accompanying pathogenic attributes: A potential threat. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2022, vol. 28, iss. 1, pp. 77–90. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01138-y>

Ullah R., Junaid M., Kanwal M., Adnan M., Nawaz T., Ahmed N., Hassan S. Status of research and applications of bio-fertilizers: Global scenario. In: *Biofertilizers for Sustainable Soil Management*. Boca Raton, CRC Press, 2023, pp. 225–247.

Vassileva M., Flor-Peregrin E., Malusá E., Vassilev N. Towards better understanding of the interactions and efficient application of plant beneficial prebiotics, probiotics, postbiotics and synbiotics. *Frontiers in Plant Science*, 2020, vol. 11, pp. 1068–1076. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01068>

Voronina E., Sidorova I. Rhizosphere, mycorrhizosphere and hyphosphere as unique niches for soil-inhabiting bacteria and micromycetes. In: *Advances in PGPR Research*. Boston, CABI, 2017, pp. 165–186. <https://doi.org/10.1079/9781786390325.0165>

Vries F. T., Wallenstein M. D. Below-ground connections underlying above-ground food production: A framework for optimising ecological connections in the rhizosphere. *Journal of Ecology*, 2017, vol. 105, iss. 4, pp. 913–920. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12783>

Vurro M., Prandi C., Baroccio F. Strigolactones: How far is their commercial use for agricultural purposes? *Pest Management Science*, 2016, vol. 72, iss. 11, pp. 2026–2034. <https://doi.org/10.1002/ps.4254>

Wallenstein M. D. Managing and manipulating the rhizosphere microbiome for plant health: A systems approach. *Rhizosphere*, 2017, vol. 3, pt. 2, pp. 230–232. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.04.004>

Wang H., Liu R., You M. P., Barbetti M. J., Chen Y. Pathogen biocontrol using plant growth-promoting bacteria (PGPR): Role of bacterial diversity. *Microorganisms*, 2021, vol. 9, iss. 9, article no. 1988. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>

Wani S. H., Kumar V., Shriram V., Sah S. K. Phytohormones and their metabolic engineering for abiotic stress tolerance in crop plants. *The Crop Journal*, 2016, vol. 4, iss. 3, pp. 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2016.01.010>

Win T. T., Barone G. D., Secundo F., Fu P. Algal biofertilizers and plant growth stimulants for sustainable agriculture. *Industrial Biotechnology*, 2018, vol. 14, iss. 4, pp. 203–211. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.0010>

Yadav A., Yadav K. Challenges and opportunities in biofertilizer commercialization. *SVOA Microbiology*, 2024, vol. 5, iss. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.58624/SVOAMB.2024.05.037>

Yakanto K., Shutsrirung A. Use of different materials as a carrier for plant growth promoting bacteria. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.14456/apst.2017.26>

Yakhin O. I., Lubyantsev A. A., Yakhin I. A., Brown P. H. Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 2017, vol. 7, article no. 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>

What is covered under biofertilizers market? *The Business Research Company*, 2025. Available at: <http://www.thebusinessresearchcompany.com/report/biofertilizers-global-market-report> (accessed April 7, 2025).

Biofertilizers and biological control agents based on rhizosphere microorganisms

N. V. Syrchina ^{1✉}, L. V. Pilip ², T. Ya. Ashikhmina ^{1,3}

¹ Vyatka State University

36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia

² Vyatka State Agrotechnological University

133 Oktyabrsky Pr., Kirov 610017, Russia

³ Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Republic of Komi 167982, Russia

Received: April 27, 2025 / revised: June 14, 2025 / accepted: June 16, 2025 / published: October 15, 2025

Abstract. Focus on replacing synthetic fertilizers, growth regulators and plant protection products with biological products helps reducing the environmental impact, preserving biological diversity and soil fertility, and slowing down the depletion of natural resources. Plant-friendly rhizosphere microorganisms (bacteria, fungi, and algae) are of particular interest for the creation of commercial biopreparations (biofertilizers, biostimulants, and biological control agents). The article provides a review of research publications devoted to the production and use of agricultural biopreparations (inoculants) based on plant growth-promoting microorganisms (PGPR), plant growth-promoting fungi (PGPF) and eukaryotic microalgae. According to available estimates, the biofertilizer market volume should reach \$ 2.83 billion in 2025. Large companies operating in the biopreparation market focus on the development of innovative products that can increase the suppressive capacity and fertility of soils by improving microbial diversity, increasing the availability of nutrients, and suppressing dangerous phytopathogens. The leading trend of recent decades has been the orientation of producers toward the introduction of genetic engineering technologies that allow inoculants to be adapted to the specific needs of agricultural crops, to increase their efficiency and resistance to adverse factors, and to ensure successful integration with indigenous microbial communities. The main tasks in the field of biotechnology in modern science include confirmation of the quality of bioproducts, increase in their shelf life, guarantee of their efficiency, cost price reduction, and provision of environmental and sanitary safety. To ensure the proper quality of biopreparations and the guaranteed effect of their use, it is necessary to develop technologies for the production of large quantities of pure (free from other microorganisms) inoculants with a high infection potential.

Keywords: rhizosphere, biofertilizers, biological control agents, inoculants, biofertilizer production, arbuscular mycorrhiza fungi

Ethics approval and consent to participate: This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Syrchina N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Biofertilizers and biological control agents based on rhizosphere microorganisms. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2025, no. 3, pp. 344–364 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-3-344-364>

✉ *Corresponding author:* Laboratory of Biomonitoring of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and Vyatka State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Nadezhda V. Syrchina: <https://orcid.org/0000-0001-9695-7146>, nvms1956@mail.ru; Larisa V. Pilip: <https://orcid.org/0000-0001-8049-6760>, pilip_larisa@mail.ru; Tamara Ya. Ashikhmina: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0047>, ecolab2@gmail.com.