

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406>
УДК 635.21:632.937.3



Перспективы применения различных видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus* sp.) в биологической защите картофеля от болезней в условиях Европейского Севера России

© 2024. З. П. Котова¹✉, Т. А. Данилова¹, Л. Г. Данилов², М. В. Архипов¹

¹Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

²ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», г. Пушкин, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Разработка экологически безопасных систем защиты растений от грибных патогенов с использованием симбиотических бактерий *Xenorhabdus* sp. – симбионтов энтомопатогенных нематод (ЭПН) в последние годы является новым направлением в сельскохозяйственной практике и несомненно представляет актуальность и научную значимость. В исследованиях использовали суспензии живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий-симбионтов различных видов ЭПН (*Steinernema carpocapsae*, *S. feltiae* и *S. feltiae protense*) с титром бактериальных клеток 10^7 КОЕ/мл в сравнении с биологическим препаратом Фитоспорин-М (наста) и водой в качестве контроля. В лабораторных условиях при температуре 25 °С нами установлены различия в антибиотической активности первичных форм продуцентов *Xenorhabdus* sp., выделенных из различных видов ЭПН. Наибольшее ингибирование зоны роста гриба на 4-й день отмечено у метаболитов штамма *S. carpocapsae* в отношении *Alternaria solani*. Биологическая эффективность в подавлении этого патогена составила 51 %. Полевые исследования 2022-2023 гг. в условиях Республики Карелия на среднераннем сорте картофеля Ред Скарлетт, показали, что при эпифитотии (низкие температуры воздуха и избыточное переувлажнение) двукратное опрыскивание вегетирующих растений суспензией живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий (ЭПН-1-1, ЭПН-2 и ЭПН-2-1) снижали развитие ризоктониоза по сравнению с контрольным вариантом на 50, 64 и 60 % соответственно. Установлено, что двукратная обработка живой и автоклавированной водной суспензией бактерий-симбионтов подвида *S. feltiae* была более эффективна и обеспечивала уменьшение степени развития симптомов парши обыкновенной в 1,3–2,8 раза и распространение ризоктониоза в 1,5–2,0 раза. Выявлено также, что двукратное опрыскивание растений во время вегетации живой и автоклавированной суспензией симбиотических бактерий *S. feltiae* достоверно увеличивает урожайность клубней на 35–22 % соответственно. Таким образом, использование биологически активных вторичных метаболитов *Xenorhabdus* sp. в качестве биологических средств защиты растений от возбудителей заболеваний на картофеле имеет значительный потенциал.

Ключевые слова: *Xenorhabdus bovienii* энтопатогенные нематоды, картофель, *Streptomyces scabies* (Thaxter) Waksman & Henrici), *Rhizoctonia solani* J. G. Kuhn, *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, *Phoma exigua* var. *exigua*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-26-20029), <https://grant.rscf.ru/site/user/bids?role=master>

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Котова З. П., Данилова Т. А., Данилов Л. Г., Архипов М. В. Перспективы применения различных видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus* sp.) в биологической защите картофеля от болезней в условиях Европейского Севера России. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(3):395–406.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406>

Поступила: 29.02.2024

Принята к публикации: 23.05.2024

Опубликована онлайн: 26.06.2024

Prospects for the use of various species and strains of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus* sp.) in the biological protection of potatoes from diseases in the European North of Russia

© 2024. Zinaida P. Kotova¹✉, Tatyana A. Danilova¹, Leonid G. Danilov², Mikhail V. Arkhipov¹

¹North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, Saint-Petersburg, Russian Federation,

²All-Russian Research Institute for Plant Protection, Pushkin, Saint-Petersburg, Russian Federation

Research on the development of environmentally friendly plant protection systems against fungal pathogens using symbiotic bacteria *Xenorhabdus* sp. – symbionts of entomopathogenic nematodes (EPN) has been a new direction in agricultural practice in recent years and undoubtedly represent relevance and scientific significance. The studies used suspensions of live and autoclaved cultures of symbiotic bacteria of symbionts of various types of EPN (*Steinernema carpocapsae*, *S. feltiae* and *S. feltiae protense*) with a bacterial cell titer of 10^7 CFU/ml in comparison with the biological preparation *Phytopsporin-M* (dough) and water as a control. In laboratory conditions at a temperature of 25 °C, there were established differences in the antibiotic activity of the primary forms of producers of *Xenorhabdus* sp., isolated from different types of EPN. The greatest inhibition of the fungal growth zone on the 4th day was observed for metabolites of the *S. carpocapsae* strain against *Alternaria solani*. Biological effectiveness in suppressing this pathogen was 51 %. Field research conducted in 2022–2023 in the conditions of the Republic of Karelia on the mid-early potato variety ‘Red Scarlett’, showed that under epiphytotic conditions (low air temperatures and excessive waterlogging) double spraying of vegetative plants with a suspension of live and autoclaved cultures of symbiotic bacteria (EPN-1-1, EPN-2 and EPN-2 -1) reduced the development of rhizoctoniosis compared to the control variant by 50, 64 and 60 %, respectively. It was found that double treatment with a live and autoclaved aqueous suspension of bacteria, symbionts of the subspecies *S. feltiae* was more effective and ensured a reduction in the degree of development of scab symptoms by 1.3–2.8 times and the spread of rhizoctonia by 1.5–2.0 times. It has been also established that 2-fold spraying of plants with a live and autoclaved suspension of symbiotic bacteria *S. feltiae* during the growing season significantly increases the yield of tubers by 35–22 %, respectively. Thus, the use of biologically active secondary metabolites of *Xenorhabdus* sp. has significant potential as biological plant protection agents against potato pathogens.

Keywords: *Xenorhabdus bovienii* entomopathogenic nematodes, potato, *Streptomyces scabies* (Thaxter) Waksman & Henrici, *Rhizoctonia solani* J. G. Kuhn, *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, *Phoma exigua* var. *exigua*

Acknowledgments: the research was carried out under the financial support of the Russian Science Foundation (Grant No. 24-26-20029), <https://grant.rscf.ru/site/user/bids?role=master>

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Kotova Z. P., Danilova T. A., Danilov L. G., Arkhipov M. V. Prospects for the use of various species and strains of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus* sp.) in the biological protection of potatoes from diseases in the European North of Russia. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):395–406. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406>

Received: 29.02.2024

Accepted for publication: 23.05.2024

Published online: 26.06.2024

Поиск биологических средств защиты, эффективных в отношении возбудителей грибных болезней растений, для использования их в интегрированных системах защиты растений и в качестве альтернативы химическим пестицидам в органическом земледелии привлекает всё большее внимание исследователей. Использование микроорганизмов, в том числе и энтомопатогенных нематод (ЭПН), в биологической борьбе с насекомыми-вредителями и болезнями востребовано и приобретает особую значимость в современном сельскохозяйственном производстве. Находясь в мутуалистических взаимоотношениях с симбиотическими бактериями (*Eubacteriaceae*) родов *Xenorhabdus* и *Photorhabdus*, нематоды способны заражать более тысячи видов насекомых из различных отрядов, поражая все фазы развития, кроме

яйца. Энтомопатогенные нематоды семейств *Steinernematidae* и *Heterorhabditidae* и их симбиотические бактерии в последние годы широко изучаются во всем мире как агенты микробиологического контроля численности насекомых-вредителей и возбудителей заболеваний растений [1, 2]. Инвазионные личинки нематод, активно проникая в тело насекомых, несут в его гемолимфу симбиотических бактерий, которые убивают насекомое, способствуют развитию и размножению нематод в теле. При размножении бактерии, производя комплекс метаболитов и преодолевая таким образом иммунную систему насекомых, приводят к их гибели и подавляют рост различных грибных и бактериальных возбудителей заболеваний внутри тела погибшего насекомого [3, 4, 5, 6].

Что касается фактора вирулентности симбиотических бактерий, то отмечается, что даже в пределах одного и того же вида между различными штаммами существуют различия в биологической активности [7]. Взаимосвязь между симбиотическими бактериями и их хозяевами-нематодами указывает на процессы, которые влияют на биологическую активность нематодно-бактериальных комплексов, специфичность, отбор и функцию симбионтов и в настоящее время рассматривается как модель для фундаментальных исследований в области экологии, эволюции, биохимии и молекулярной генетики симбиоза [8, 9]. По результатам исследований, например, у нематод вида *S. carpocapsae* (Weiser) установлен более высокий индекс летальности в отношении насекомых-хозяев, особенно при высоких температурах окружающей среды (25–28 °C), в то время как у *S. feltiae* и, особенно подвида *S. feltiae protense*, нематоды более активны при низких температурах [10]. Эти различные стратегии двух видов и подвида нематод могут быть связаны и с уровнем токсичности их симбиотических бактерий. Из исследований, посвященных изучению эффективности различных изолятов бактерий-симбионтов против насекомых, вид *X. Nematophilus* оценивается как более агрессивный и смертоносный, чем *X. bovienii* при температурах выше 25 °C. Таким образом, можно предположить, что у нематодно-бактериальных комплексов существует баланс между двумя организмами, который делает виды и штаммы симбиотических бактерий хорошими кандидатами для использования в качестве биологических агентов. Кроме того, стабильность продуцируемых симбиотическими бактериями вторичных метаболитов при автоклавировании повышает эффективность работы с такими соединениями и их хранением [7]. Жидкие культуры видов и штаммов *Xenorhabdus* эффективны против широкого спектра вредителей растений от бактерий до грибов, простейших и насекомых. Вторичные метаболиты, продуцируемые *Xenorhabdus budapesti*, например, эффективно снижают показатели фитофтороза яблонь, а также оказывают сильное токсичное воздействие как на зооспоры, так и на цистоспоры *Phytophthora nicotianae* [11].

В связи с этим весьма актуальна разработка экологически безопасных технологий защиты растений картофеля от вредных организмов с использованием симбиотических бактерий ЭПН и продуктов их метаболизма.

Цель исследования – оценить возможность использования живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus*, энтомопатогенных нематод семейства *Steinernematidae* в биологической защите картофеля от возбудителей заболеваний.

Научная новизна – в результате изучения и оценки эффективности продуктов метаболизма различных видов и штаммов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus* энтомопатогенных нематод сем. *Steinernematidae* против возбудителей заболеваний растений картофеля показана перспективность дальнейшей работы в данном направлении и возможности полифункционального использования препаратов, изготавливаемых на основе энтомопатогенных нематод и симбиотических бактерий.

Материал и методы. Лабораторные исследования проводили на базе Всероссийского института защиты растений (г. Пушкин). Виды и штаммы симбиотических бактерий, используемые в экспериментах, были получены путем заражения гусениц большой вошинной моли (*Galleria mellonella*) видами нематод *S. carpocapsae*, *S. feltiae* и подвида *S. feltiae protense*. Трупы погибших от заражения нематодами насекомых поверхностно стерилизовали в 70%-ном спирте в течение 2 мин. и помещали для сушки в ламинарный поток воздуха в течение 3 мин. Затем из ложноножки отдельной гусеницы стерильно отбирали каплю гемолимфы, которую переносили в чашку Петри на питательную среду NBTA и инкубировали при 26 °C.

После 72 часов отбирали чистые колонии симбиотических бактерий (зеленые) из колоний одинакового размера и морфологии. Идентификацию первичных форм симбиотических бактерий проводили по методу Акхурста (R. J. Akhurst) [12]. В лабораторных опытах при оценке влияния симбиотических бактерий и продуктов их метаболизма на возбудителей заболеваний картофеля грибные патогены высевали в чашки Петри на среду Чапека и выращивали при 25 °C в течение 5–7 суток. В качестве контроля использовали среду NBTA без симбиотических бактерий. Все варианты опытов и контроля были заложены в 4-кратной повторности.

Антибиотическую активность симбиотических бактерий определяли методом креста по диаметру зоны роста патогена при 20–25 °C. Учеты ингибирующего действия бактерий на патогены проводили на 2, 3 и 4 дни [13]. На основании сравнительной оценки антибиотической активности симбиотических бактерий по зоне ингибирования роста грибов определяли

их антибиотическую активность в отношении тестируемых видов. Биологическую активность рассчитывали по формуле У. С. Эббот (W. S. Abbott)¹.

Полевые исследования проводили в 2022-2023 годах в Пряжинском районе Республики Карелия на среднераннем картофеле сорта Ред Скарлетт, который характеризуется восприимчивостью к возбудителю фитофтороза². Почвы участка – дерновые слабоподзолистые, легкосуглинистые, хорошо окультуренные (рН_{сол.} – 5,1, содержание гумуса – 3,9 %, подвижного фосфора – P₂O₅ > 250, калия – K₂O – 168 мг на 1 кг почвы).

В полевых и лабораторных экспериментах использовали отдельные варианты живых и автоклавированных культур бактерий с соответствующим обозначением. Культуры бактерий вида *X. nematophila* – симбионта нематод *S. carpocapsae* обозначены соответственно – ЭПН-1 и ЭПН-1-1, *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae* – ЭПН-2 и ЭПН-2-2, *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae protense* – ЭПН-3 и ЭПН-3-3. Титр живых и автоклавированных культур составлял 10⁷ КОЕ/мл. Для сравнительной оценки эффективности в качестве эталона в опытах использовали Фитоспорин-М (паста).

Схема полевого эксперимента включала 8 вариантов: 1 – обработка Фитоспорин-М; 2, 3, 4, 5, 6, 7 – обработка соответствующей суспензией различных культур бактерий: ЭПН-1, ЭПН-2 ЭПН-3 (живые культуры) и ЭПН-1-1, ЭПН-2-2, ЭПН-3-3 (автоклавированные культуры); 8 – контроль (без обработок).

Обработки проводили перед посадкой клубней и дважды по вегетирующим растениям в фазы «полные всходы» (III декада июня) и «начало цветения» (III декада июля). Расход рабочего раствора – 40 л/га. Площадь опытной делянки – 3 м² (1,5х2 м), повторность – шестикратная, размещение вариантов – рендомизированное. Посадка картофеля проведена в 2022 году 4 июня, в 2023 году – 20 мая. Агротехника, применяемая в опытах – общепринятая для региона. Основную уборку проводили после скашивания ботвы. Учет урожая – сплошным весовым методом. Достоверность различий средних значений отдельных свойств оценивали на 5%-ном уровне значимости по критерию Фишера. Полученные результаты обрабатывали методом дисперсионного анализа с

использованием пакета статистических программ Statistica 12.1 (Stat-SoftInc., USA).

Расчёт развития болезней: парши обыкновенной (*Streptomyces scabies* (Thaxter) Waksman & Henrici), ризоктониоза (*Rhizoctonia solani* J. G. Kuhn), фитофтороза (*Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, фомоза (*Phoma exigua* var. *exigua*) проводили по формуле:

$$R = \frac{\Sigma(A \times B)}{N \times K} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где R – развитие болезни, %; $\Sigma(A \times B)$ – сумма произведений числа больных растений (A) на соответствующий им балл поражения (B); N – общее количество учтённых растений (здоровых и больных); K – высший балл шкалы учёта.

Оценку эффективности биопрепаратов рассчитывали путём сравнения развития болезни в опытном и контрольном вариантах на дату учета по формуле:

$$БЭ = \frac{R_k - R_0}{R_k} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где БЭ – биологическая эффективность, %; R_k – развитие болезни в контрольном варианте, %; R_0 – развитие болезни в опытном варианте, %.

Результаты и их обсуждение. В лабораторных условиях нами изучено действие продуктов метаболизма трех изолятов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus*, выделенных из природных популяций энтомопатогенных нематод (ЭПН) в отношении грибов-возбудителей заболеваний растений *F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani*. На основании сравнительной оценки антибиотической активности симбиотических бактерий по зоне ингибирования роста грибов установлены различия первичных форм продуцентов *Xenorhabdus*, выделенных из изучаемых видов ЭПН. Антигрибная активность у всех испытуемых штаммов была наиболее высокой при их использовании против *A. solani*. При этом наибольшее ингибирование зоны роста данного гриба при температуре 25 °С отмечено на 4-й день у метаболитов штамма *S. carpocapsae* – 18,5±0,9 мм (рис. 1).

Несколько ниже по сравнению с *S. carpocapsae* по антибиотической активности показали себя метаболиты штаммов *S. feltiae* и *S. feltiae protense*, у которых зона роста гриба составила в диапазоне от 25±1,2 до 28±1,6 мм. Нами не выявлена существенная антигрибная активность всех испытуемых

¹Abbott W. S. A method of computing the effectiveness of an insecticide. Journal of Economic Entomology. 1925;18:265–267.

²Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Сорта растений (официальное издание). М., 2018. Т.1. 504 с.

штаммов бактерий при температуре 25 °C при использовании их против *F. solani* и *F. culmorum*. Вместе с тем у гриба *F. culmorum* отмечается незначительное снижение зоны его роста при внесении *S. feltiae* и *S. protense*.

Более наглядно выглядит сравнительная характеристика антибиотической активности исследуемых изолятов бактерий при оценке их биологической эффективности против трех видов грибов (рис. 2).

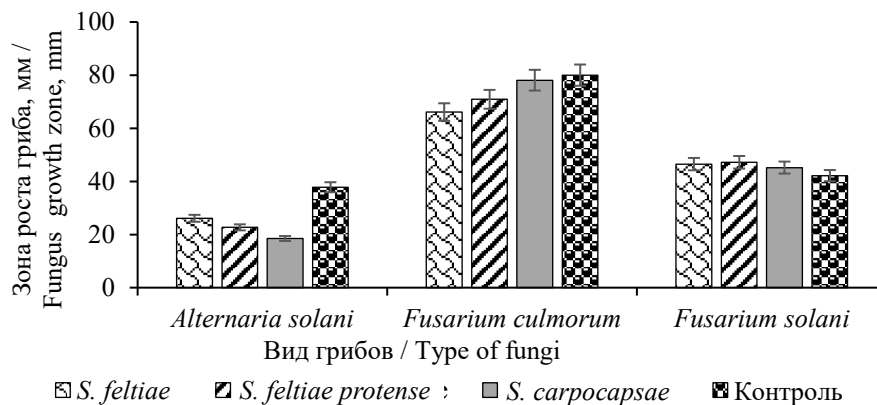


Рис. 1. Антибиотическая активность симбиотических бактерий (*Xenorhabdus*), выделенных из природных популяций энтомопатогенных нематод (*Rhabditida: Steinernematidae*), 25 °C /

Fig. 1. Antibiotic activity of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus*) isolated from natural populations of entomopathogenic nematodes (*Rhabditida: Steinernematidae*), 25 °C

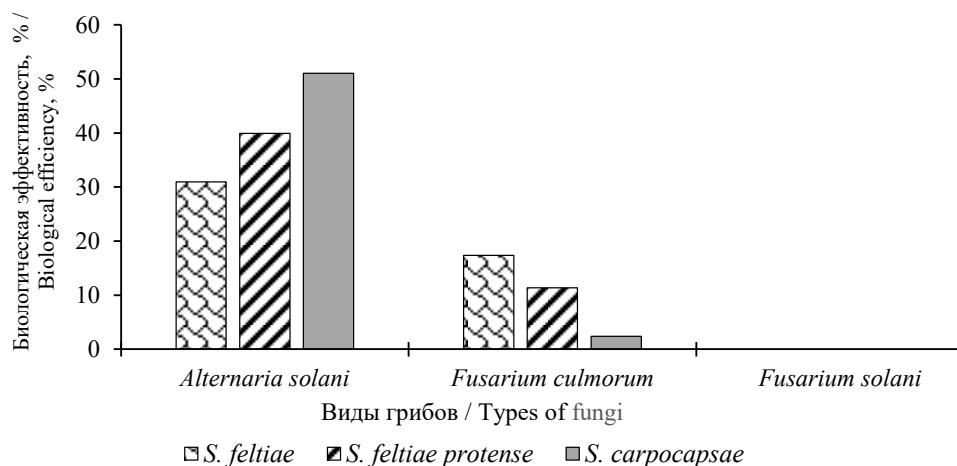


Рис. 2. Биологическая эффективность ЭПН против патогенов (*F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani*), 25 °C /

Fig. 2. Biological effectiveness of EPN against pathogens (*F. culmorum*, *F. solani* and *A. solani*), 25 °C

Наибольшая эффективность в подавлении *A. solani* (51,3 %) отмечена также у *S. carpocapsae*. У метаболитов штаммов *S. feltiae* и *S. feltiae protense* эти показатели составили соответственно 31 и 40 %. У гриба *F. culmorum* биологическая эффективность изучаемых штаммов колебалась в диапазоне от 5 до 15 %. Бактерии-симбионты нематод исследуемых штаммов против *F. solani* по биологической эффективности имели отрицательные показатели.

Таким образом, в результате изучения действия продуктов метаболизма 3 видов и штаммов симбиотических бактерий рода

Xenorhabdus в отношении грибов-возбудителей заболеваний растений (*F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani*) при температуре 25 °C установлено, что все они проявляют антибиотическую активность против патогенных грибов *A. solani* и *F. culmorum*. В то же время при температуре 25 °C изучаемые метаболиты оказались малоэффективными против гриба *F. solani*. В этой связи считаем необходимым продолжить исследования в направлении более детального изучения влияния температуры на антибиотическую активность видов и штаммов симбиотических бактерий ЭПН.

Полученные результаты лабораторных опытов вызвали необходимость их проверки в полевых условиях. При этом была поставлена задача оценить перспективы применения трех видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus sp.*) в биологической защите картофеля от широкого спектра грибных болезней в условиях Европейского Севера России при более контрастном температурно-влажностном режиме.

Агрометеорологические условия полевых сезонов 2022-2023 гг. представлены в таблице 1. Условия вегетации растений картофеля в 2022 году были достаточно благоприятными для его выращивания: полные всходы отмечены уже через три недели, распределение осадков было неравномерным, развитие фитофтороза шло доста-

точно медленно. Вегетационный период 2023 года сложился крайне неблагоприятно для развития картофеля: средние температуры июня месяца и отсутствие осадков во время начальной фазы вегетации (всходы) привели к появлению полных всходов картофеля лишь спустя 5 недель. Выпавшие осадки в июле месяце превысили средние многолетние показатели этого периода в 1,8 раза. Такая увлажненность и невысокие температуры способствовали эпифитотийному развитию фитофтороза на листьях. Визуальный осмотр состояния опытных посадок показал, что на 5 августа основная масса листьев была поражена фитофторой, оцениваемой от 1 до 3 баллов. Из-за возможности проникновения спор заболевания в клубни было принято решение убрать ботву.

Таблица 1 – Характеристика агрометеоусловий вегетационных периодов 2022-2023 гг. (по данным архива погоды на метеостанции)³
Table 1 – Characteristics of agro-meteorological conditions of the growing seasons 2022-2023 (according to the weather archive at the weather station)

Месяц / Month	2022 г.	2023 г.	Среднее многолетнее значение / Average perennial value
Среднемесячная температура воздуха, °C / Average monthly air temperature, °C			
Май / May	8,6	12,7	7,3
Июнь / June	15,3	13,8	13,5
Июль / July	18,8	15,6	16,0
Август / August	18,3	19,2	14,0
Среднее за вегетацию / For the growing season average	17,5	15,3	16,9
Сумма осадков, мм / Precipitation amount, mm			
Май / May	9,9	10,1	41,0
Июнь / June	71,5	38,6	59,0
Июль / July	104,6	155,8	85,0
Август / August	102,5	2,0	70,0
Сумма за вегетацию / The amount for the growing season	278,6	196,4	255,0
Гидротермический коэффициент по Селянинову / Selyaninov hydrothermal coefficient			
За вегетацию / During the growing season	1,8	1,8	-

Проведенные фенологические наблюдения и данные биометрических измерений показали, что фазы роста и развития растений картофеля по вариантам наступали одновременно. Изучаемые суспензии в виде живой культуры симбиотических бактерий оказали положительное влияние на рост и развитие растений в начальной фазе роста. Измерение высоты растений в фазу «полные всходы»

показало, что ЭПН-2 достоверно увеличивали этот показатель по сравнению с необработанными растениями на 7 % (табл. 2). Во время цветения исследуемые суспензии симбиотических бактерий также существенно влияли на высоту растений (за исключением ЭПН-2) и стеблеобразование, увеличивая значения показателей по сравнению с контролем соответственно на 5–11 и 18–63 %.

³Погода в Петрозаводске. [Электронный ресурс]. URL: https://m.rp5.ru/Погода_в_Петрозаводске (дата обращения: 12.01.2024)

Таблица 2 – Влияние симбиотических бактерий *Xenorhabdus* на биометрические показатели растений картофеля сорта Ред Скарлетт в различные фазы роста и развития (среднее за 2 года) /
Table 2 – The effect of symbiotic *Xenorhabdus* bacteria on the biometric parameters of 'Red Scarlet' potato plants in various phases of growth and development (average over 2 years)

Вариант опыта / Variant of the experiment	Полные всходы / Full germination		Цветение / Flowering			
	высота, см / height, cm	% от кон- троля / % of control	высота, см / height, cm	% от кон- троля / % of control	кол-во побегов, шт/раст. / shoots, pieces/ plant	% от кон- троля / % of control
Фитоспорин М / Fitosporin M	17,2	90	49,2	104	3,7	137
ЭПН / EPN-1	19,0	99	51,3	109	3,2	118
ЭПН / EPN-1-1	17,4	91	50,7	107	3,4	127
ЭПН / EPN-2	20,5	107	47,5	101	4,2	156
ЭПН / EPN-2-1	16,3	85	52,6	111	3,3	122
ЭПН / EPN-3	20,3	106	51,5	109	4,4	163
ЭПН / EPN-3-1	17,8	93	49,8	105	3,4	126
Контроль / Control	19,1	-	47,2	-	2,7	-
Стандарт. откл., ± / Standard deviation, ±	1,4	-	1,7	-	0,4	-

Наибольшее количество побегов наблюдали при обработке растений картофеля водной суспензией живых культур симбиотических бактерий нематод *S. feltiae protense* (ЭПН-2) и *S. feltiae* (ЭПН-3), что выше контроля на 56–63 % соответственно.

Иммунологическая оценка устойчивости клубней картофеля к патогенам, проведенная после уборки, показала высокую эффективность изучаемых видов симбиотических бактерий (табл. 3). В 2022 году, достаточно благоприятном для выращивания картофеля, все они снижали число клубней, пораженных паршой обыкновенной в 1,3–2,8 раза. Наиболее эффективной отмечена двукратная обработка водной суспензией живых культур симбиотических бактерий, она способствовала уменьшению степени развития симптомов болезни на клубнях до 4 %, в контроле – 21 %. В зависимости от вида применяемых симбиотических бактерий распространение ризоктониоза снижалось на 38–69 %, а степень его развития в 1,5–2,0 раза по сравнению с контрольным вариантом. Максимальное ингибирование гриба *Rhizoctonia solani* вызывала обработка вегетирующих растений водной суспензией живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий культур ЭПН-1 и ЭПН-1-1, при которой отмечалось снижение степени развития болезни до 6,0 % против 12 % в контроле.

В эпифитотийном 2023 году двукратное опрыскивание вегетирующих растений культурами бактерий ЭПН-1-1, ЭПН-2 и ЭПН-2-1 способствовало снижению заболеваемости ризоктониозом по сравнению с контрольным вариантом на 50, 64 и 60 % соответственно. Другие живые суспензии симбиотических бактерий были менее эффективны, но их применение также снижало развитие ризоктониоза по сравнению с контролем на 10–44 %. Высокие показатели по сдерживанию грибной инфекции на клубнях картофеля получили при использовании суспензии симбиотических бактерий подвида *S. feltiae protense* (ЭПН-2) (табл. 3).

Наши исследования согласуются с выводами других авторов, свидетельствующими о том, что вирулентность симбионтов, даже в пределах одного и того же вида, между различными штаммами различается по биологической активности [7]. Так, нематоды вида *S. carpocapsae*, как и их симбиотические бактерии, показали более высокий индекс летальности в отношении насекомых-хозяев, особенно при высоких температурах окружающей среды (25–28 °C), в то время как *S. feltiae* и, особенно *S. feltiae protense*, работали лучше при более низких температурах [11].

Таблица 3 – Действие двукратной обработки культурами симбиотических бактерий (*Xenorhabdus*) на распространение и развитие патогенов на клубнях картофеля сорта Ред Скарлетт в 2022 и 2023 гг./
Table 3 – The effect of double treatment with cultures of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus*) on the spread and development of pathogens on potato tubers of the ‘Red Scarlet’ variety in 2022 and 2023

Вариант опыта / Variants of the experiment	<i>Streptomyces scabies</i>		<i>Rhizoctonia solani</i>		<i>Phytophthora infestans</i>		<i>Phoma foveatam</i>	
	P*, %	R**	P, %	R	P, %	R	P, %	R
Фитоспорин-М / Fitosporin-M	$\frac{27,5}{0}$	$\frac{7,5}{0}$	$\frac{30}{15,1}$	$\frac{7,9}{3,8}$	$\frac{0}{1,4}$	$\frac{0}{1,0}$	$\frac{0}{3,6}$	$\frac{0}{0,9}$
ЭПН / EPN-1	$\frac{15}{0}$	$\frac{3,8}{0}$	$\frac{24}{16,3}$	$\frac{6}{4,1}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{1,9}$	$\frac{0}{0,5}$
ЭПН / EPN-1-1	$\frac{33}{0}$	$\frac{9,2}{0}$	$\frac{38}{9}$	$\frac{5,8}{2,2}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{2}$	$\frac{0}{0,5}$
ЭПН / EPN-2	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{6,5}$	$\frac{-}{1,6}$	$\frac{-}{0,8}$	$\frac{-}{0,6}$	$\frac{-}{0,6}$	$\frac{-}{0,1}$
ЭПН / EPN-2-1	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{7,3}$	$\frac{-}{1,8}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{4,8}$	$\frac{-}{1,2}$
ЭПН / EPN-3	$\frac{-}{0,7}$	$\frac{-}{0,4}$	$\frac{-}{10,5}$	$\frac{-}{2,6}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{1,3}$	$\frac{-}{0,3}$
ЭПН / EPN-3-1	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{0}$	$\frac{-}{12,5}$	$\frac{-}{3,1}$	$\frac{-}{1,1}$	$\frac{-}{0,7}$	$\frac{-}{1,1}$	$\frac{-}{0,3}$
Контроль / Control	$\frac{42}{4,5}$	$\frac{20,8}{5,2}$	$\frac{78}{18,2}$	$\frac{12,1}{4,5}$	$\frac{0}{4,5}$	$\frac{0}{5,2}$	$\frac{0}{4,5}$	$\frac{0}{1,1}$

*P – распространение болезни / spread of disease; **R – развитие болезни / development of the disease; числитель / numerator – 2022 г., знаменатель / denominator – 2023 г.

Ранее другими исследователями было показано, что использование продуктов метаболизма симбиотических бактерий энтомопатогенных нематод способствовало подавлению развития парши обыкновенной *Streptomyces scabies*, увеличению активности пероксидазы в листьях картофеля *Solanum tuberosum* L., урожайности и качества клубней, а также повышению уровня ферментативной активности в почве в конце вегетационного периода растений. Также было установлено, что в опытах *in vitro* обработка продуктами метаболизма симбиотических бактерий повышает устойчивость картофеля к заражению возбудителем фитофтороза. Кроме того, в тканях клубней, зараженных фитофторой, отмечалось уменьшение количества некротических клеток и активности каталазы в 1,7 раза [14].

Результаты наших лабораторных экспериментов и двухлетние полевые исследования подтверждают тот факт, что у нематодно-бактериальных комплексов существует баланс между двумя организмами, в частности между нематодами и их симбионтами: *S. Feltiae*/X. *Bovienii* или *S. carpocapsae*/X. *nematophila*. Такой комплекс может быть использован в качестве биологического агента, контролирующего комплекс организмов-вредителей растений.

Аналогичные симбиотические связи между двумя организмами симбионтами отмечают и другими авторами [15]. Кроме того, стабильность продуцируемых этими микроорганизмами вторичных метаболитов при автоклавировании в режиме 121 °C в течение 20 мин, вероятно, повышает простоту работы с такими соединениями и их хранением [7].

В наших исследованиях биологическая эффективность (БЭ) изучаемых симбиотических бактерий по вариантам опыта составила: против *S. Scabies* – 82–100 %; *R. solani* – 25–64 %; *P. infestans* – 88–100 %; *P. foveatam* – 38–75 % (рис. 3). Показано, что в целом симбиотические бактерии более эффективны на клубнях против парши обыкновенной и фитофтороза. Максимальный эффект отмечали при двукратном опрыскивании листовой поверхности ЭПН-2 и ЭПН-3.

Всесторонняя оценка действия видов и штаммов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus* в развитии растений выявила не только антибактериальный эффект, но и фиторегуляторный. Так, при обработке клубней и растений картофеля в фазы «полные всходы» и «начало цветения» отмечали ускоренное их развитие во время вегетации и, как следствие, увеличение урожайности по сравнению с контрольным (не обработанным) вариантом (табл. 4).

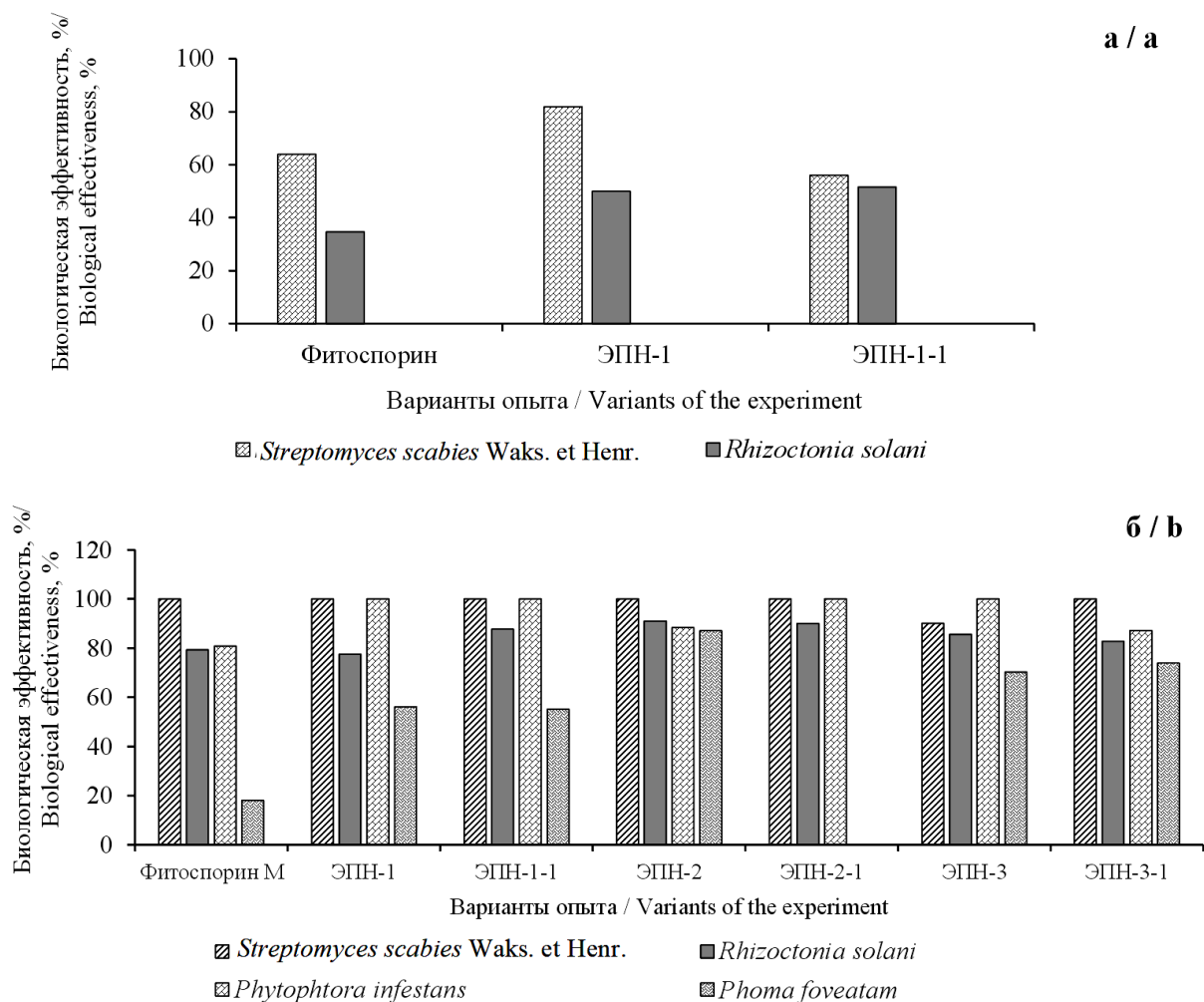


Рис. 3. Биологическая эффективность *Xenorhabdus* (%) на клубнях картофеля сорта Ред Скарлетт от различных патогенов: а – 2022 г.; б – 2023 г. /

Fig. 3. Biological effectiveness of *Xenorhabdus* (%) against various pathogens on tubers of the 'Red Scarlett' potato variety: a – 2022; b – 2023

Таблица 4 – Урожайность картофеля сорта Ред Скарлетт в зависимости от обработок различными видами *Xenorhabdus* /

Table 4 – The yield of 'Red Scarlett' potatoes depending on the treatments with various types of *Xenorhabdus*

Вариант опыта / Variant of the experiment	Урожайность, т/га / Productivity, t/ha			К контролю / To control			
	2022 г.	2023 г.	среднее / average	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Фитоспорин М / Fitosporin M	35,44	16,66	26,05	7,31	-0,12	126	99
ЭПН / EPN-1	32,66	14,64	23,65	4,53	-2,14	116	87
ЭПН / EPN-1-1	36,68	17,20	26,94	8,55	0,42	130	102
ЭПН / EPN-2	-*	22,72	22,72	-	5,94	-	135
ЭПН / EPN-2-1	-	20,45	20,45	-	3,67	-	122
ЭПН / EPN-3	-	20,0	20,00	-	3,22	-	119
ЭПН / EPN-3-1	-	19,3	19,30	-	2,52	-	115
Контроль / Control	28,13	16,78	22,46	-	-	-	-
HCP / LSD ₀₉₅	2,06	1,41	-	-			

*По данным вариантам в 2022 г. исследования не проводили /

* No studies were conducted by these variants in 2022

Как видно из данных таблицы 4, урожайность клубней картофеля в эпифитотийном 2023 году была значительно ниже по вариантам опыта в среднем в два раза по сравнению с благоприятным для выращивания картофеля 2022 годом. Если учесть, что листья картофеля на 05.08.2023 были на 100 % поражены *P. infestans* и удалены (скошены), то влияние изучаемых симбиотических бактерий было существенным на начальном этапе роста и развития растений. Стимулирующий эффект препаратов на основе бактерий рода *Xenorhabdus* сопровождается увеличением побегообразования и вегетирующей массы растений и, как следствие, усилением физиологических ростовых процессов и клубнеобразования [16].

В 2022 году положительное действие на клубнеобразование оказали исследуемые штаммы живых и автоклавированных культур ЭПН-1 и ЭПН-1-1, двукратное опрыскивание которыми способствовало увеличению урожайности клубней по сравнению с контролем на 16–30 % соответственно. Наибольшее увеличение урожайности клубней в 2023 году отмечено в вариантах с применением живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae* – ЭПН-2 (35 %) и ЭПН-2-1 (22 %). Несколько меньшие показатели по урожайности клубней получены от применения *X. bovienii* – симбионта нематод *S. feltiae protense* – ЭПН-3 (19 %) и ЭПН-3-1 (15 %), однако все они значительно превышали результаты по применению живых и автоклавированных культур бактерий вида *X. nematophila* – симбионта нематод *S. carpocapsae* (ЭПН-1 и ЭПН-1-1). Полученные нами результаты подтверждают тот факт, что при неблагоприятных условиях (низкие температуры) эффективность симбиотических бактерий *S. feltiae* и *S. feltiae protense* значительно выше *S. carpocapsae* [12].

Заключение. Оценка влияния продуктов метаболизма культур и изолятов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus*, выделенных из природных популяций энтомопатогенных нематод (*Rhabditida: Steinernematidae*) ЭПН, в отношении грибов-возбудителей заболеваний растений – *F. culmorum*, *F. solani* и *A. solani* показала, что антигрибная активность у всех испытываемых штаммов была наиболее высокой при использовании их против *A. solani*. Наибольшее ингибирование зоны роста гриба отмечено у метаболитов штамма *X. nematophila*.

Таким образом, симбиотические бактерии и продукты их метаболизма как в условиях *in vitro*, так и *in vivo* продемонстрировали значительные возможности их использования

в биологической защите растений картофеля от грибных патогенов. Практическое внедрение такого экологически безопасного метода снижения пораженности растений опасными патогенами представляет значительный экономический интерес в сельскохозяйственном производстве. Однако многие вопросы, связанные с эффективным внедрением и получением необходимых результатов, требуют дополнительных исследований.

Полученные экспериментальные данные полевых исследований по эффективности использования продуктов метаболизма симбиотических бактерий против грибов-возбудителей заболеваний растений свидетельствуют о правильности выбранного направления работы в изучении возможностей полифункционального использования препаратов, изготавливаемых на основе энтомопатогенных нематод и продуктов метаболизма различных видов и штаммов симбиотических бактерий. Продукция вторичных метаболитов с антибиотическими свойствами является общей характеристикой энтомопатогенных бактерий *Xenorhabdus* spp. Изучаемые нами бактериальные культуры оказывали полифункциональное действие: положительно влияли на рост и развитие растений на начальных этапах. Выявлено, что высота растений в фазу «полные всходы» при применении препарата ЭПН-2 достоверно превышала контрольный вариант на 7 %, в последующие периоды роста (фаза «цветение») все исследуемые препараты существенно влияли на высоту и побегообразование, в среднем на 5–11 % и 18–61 %.

При двукратной обработке водной суспензией бактерий, симбионтов подвида *S. feltiae protense* получили наилучшие показатели по сдерживанию грибной инфекции на клубнях и уменьшению степени развития симптомов парши обыкновенной в 1,3–2,8 раза, а также распространению ризоктониоза в 1,5–2,0 раза. Полифункциональное действие штаммов симбиотических бактерий рода *Xenorhabdus* проявилось не только в подавлении патогенной инфекции на клубнях, но и способствовало усиленному клубнеобразованию. При неблагоприятных погодных условиях применение культур этих бактерий сопровождалось получением и большей урожайности клубней (на 22–35 %) по сравнению с необработанным вариантом как при применении суспензии живых, так и автоклавированных культур бактерий. В благоприятных для выращивания культуры условиях при более высокой температуре наиболее эффективным отмечен автоклавированный штамм симбиотических бактерий

нематод *S. carpocapsae*, применение которого позволило увеличить урожай клубней на 30 %. *S. carpocapsae* показал лучшую эффективность при более высоких температурах окружающей среды (25–28 °C), *S. feltiae* и *S. feltiae protense* действовали лучше при более низких.

Таким образом, всесторонняя оценка влияния продуктов метаболизма симбиотических бактерий *Xenorhabdus* sp. энтомопатогенных нематод *S. feltiae*, *S. feltiae protense*, *S. carpocapsae* на патогенную инфекцию клубней картофеля свидетельствует об их высокой эффективности против *Streptomyces scabies*,

Rhizoctonia solani, *Phytophthora infestans*, *Phoma foveatam*. Полученные экспериментальные данные по эффективности использования продуктов метаболизма симбиотических бактерий *Xenorhabdus* против грибов-возбудителей заболеваний растений на картофеле указывают на перспективы дальнейшей работы по изучению возможностей полифункционального использования препаратов, изготавливаемых на основе энтомопатогенных нематод и продуктов метаболизма различных видов и штаммов симбиотических бактерий.

References

1. Shapiro-Ilan D., Hazir S., Glazer I. Advances in use of entomopathogenic nematodes in integrated pest management. In: Kogan M., Heinrichs E. A. (eds). Integrated management of insect pests: current and future developments. Burleigh Dodds Science Publication. UK, 2020. pp. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0047.19>
2. Gawad M. A., Ruan W., Hammam M. M. A. Entomopathogenic Nematodes: Integrated Pest Management and New Vistas. Egyptian Journal of Agronomatology. 2023;22(1):1–18. DOI: <https://doi.org/10.21608/ejaj.2023.280551>
3. Павлюшин В. А., Новикова И. И., Бойкова И. В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор). Сельскохозяйственная биология. 2020;55(3):421–438. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.3.421rus> EDN: FEAOFP
4. Pavlyushin V. A., Novikova I. I., Boykova I. V. Microbiological control in phytosanitary optimization technologies for agroecosystems: research and practice (review). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2020;55(3):421–438. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2020.3.421rus>
5. Wright P. J. Morphological characterisation of the entomogenous nematodes *Steinernema* spp. and *Heterorhabditis* spp. (Nematoda: Rhabditida). New Zealand Journal of Zoology. 1990;17(4):577–585. DOI: <https://doi.org/10.1080/03014223.1990.10422955>
6. Boemare N., Biology, Taxonomy and Systematics of *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*. In: Gaugler R. (ed.). In book: Entomopathogenic nematology. CABI Publishing, CAB International, 2002. pp. 35–56. DOI: <https://doi.org/10.1079/9780851995670.0035>
7. Данилов Л. Г., Павлюшин В. А. Разработка и реализация инновационного проекта по созданию опытного производства биологических препаратов на основе энтомопатогенных нематод. Вестник защиты растений. 2019;(2(100)):52–55. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39132362> EDN: ISYMPB
8. Danilov L. G., Pavlyushin V. A. Development and implementation of an innovative project on the establishment of experimental production of biological preparations based on entomopathogenic nematodes. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2019;(2(100)):52–55. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39132362>
9. Brivio M. F., Mastore M. Nematobacterial Complexes and Insect Hosts: Different Weapons for the Same War. Insects. 2018;9(3):117. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects9030117>
10. Bisch G., Ogier J. C., Médigue C., Rouy Z., Vincent S., Tailliez P., Givaudan A., Gaudriault S. Comparative genomics between two *Xenorhabdus bovienii* strains highlights differential evolutionary scenarios within an entomopathogenic bacterial species. Genome Biology and Evolution. 2016; 8(1):148–160. DOI: <https://doi.org/10.1093/gbe/evv248>
11. Murfin K. E., Whooley A. C., Klassen J. L., Blair H. G. Comparison of *Xenorhabdus bovienii* bacterial strain genomes reveals diversity in symbiotic functions. BMC Genomics. 2015;16:889. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-015-2000-8>
12. Иванова Т. С., Ивахненко О. А., Данилов Л. Г. Новый подвид энтомопатогенных нематод семейств *Steinernema feltiae protensesubsp.* N. (Nematoda: Steinernematidae) из Якутии. Паразитология. 2001;35(4):333–337. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26019417> EDN: VXJYQB
13. Ivanova T. S., Ivakhnenko O. A., Danilov L. G. A new entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae protense subsp.* N. (Nematoda: Steinernematidae) from Yakutia. *Parazitologiya*. 2001;35(4):333–337. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26019417>
14. Boszormenyi E., Ersek T., Fodor A., Fodor A. M., Foldes L. S., Hevesi M., Hogan J. S., Katona Z., Klein M. G., Kormany A., Pekar S., Szentirmai A., Sztaricskai F., Taylor R. A. J. Isolation and activity of *Xenorhabdus* antimicrobial compounds against the plant pathogens *Erwinia amylovora* and *Phytophthora nicotianae*. Journal of Applied Microbiology. 2009;107(3):746–759. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04249.x>
15. Akhurst R. J. Morphological and Functional Dimorphism in *Xenorhabdus* spp., Bacteria Symbiotically Associated with the Insect Pathogenic Nematodes *Neoaplectana* and *Heterorhabditis* Free. Journal of General Microbiology. 1980;121(2):303–309. DOI: <https://doi.org/10.1099/00221287-121-2-303>

13. Данилов Л. Г., Зорина Е. А., Нашекина Т. Ю. Антибиотическая активность *Xenorhabdus* sp. (Enterobacteriaceae) симбионтов энтомопатогенных нематод (Rhabditida: Steinernematidae). Вестник защиты растений. 2017;3(93):33–38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30079319> EDN: ZIFWIV

Danilov L. G., Zorina E. A., Nashchekina T. Yu. Antibiotic activity of *Xenorhabdus* sp. (Enterobacteriaceae) symbiont of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae). *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2017;3(93):33–38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30079319>

14. Агансонова Н. Е. Эффективность продуктов метаболизма симбиотических бактерий р. *Xenorhabdus* против парши обыкновенной. Защита и карантин растений. 2016;(10):25–27.

Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26738475> EDN: WNDBOV

Agansonova N. E. Effectiveness of the products of metabolism of symbiotic bacteria p. *Xenorhabdus* against the common scab. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2016;(10):25–27. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26738475>

15. Benitez T., Rincon A. M., Limon M. C., Codon A. C. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*. 2005;7(4):249–260.

URL: https://www.researchgate.net/publication/8065870_Biocontrol_mechanism_of_Trichoderma_strains

16. Fang X. L., Li Z. Z., Wang Y. H., Zhang X. In vitro and in vivo antimicrobial activity of *Xenorhabdus bovienii* YL002 against *Phytophthora capsici* and *Botrytis cinerea*. *Journal of Applied Microbiology*. 2011;111(1):145–154.

DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05033.x>

Сведения об авторах

✉ **Котова Зинаида Петровна**, доктор с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ш. Подбельского, д. 7, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, e-mail: zinaida_kotova@mail.ru

Данилова Татьяна Алексеевна, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ш. Подбельского, д. 7, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-0695>

Данилов Леонид Григорьевич, доктор с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологической защиты растений, ФГБНУ «Всероссийский научно исследовательский институт защиты растений», ш. Подбельского, д. 3, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-1081>

Архипов Михаил Вадимович, доктор биол. наук, главный научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ш. Подбельского, д. 7, г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6903-6971>

Information about the authors

✉ **Zinaida P. Kotova**, DSc in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Agriculture and Crop Production, North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, sh. Podbelsky, 7, Saint-Petersburg, Russian Federation, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, e-mail: zinaida_kotova@mail.ru

Tatyana A. Danilova, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Agriculture and Crop Production, North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, sh. Podbelsky, 7, Saint-Petersburg, Russian Federation, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1919-0695>

Leonid G. Danilov, DSc in Agricultural Science, leading researcher, the Laboratory of Microbiological Plant Protection, All-Russian Research Institute for Plant Protection, 3, sh. Podbelsky, Pushkin, Saint-Petersburg, Russian Federation. 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3623-1081>

Mikhail V. Arkhipov, DSc in Biological Science, chief researcher, the Department of Agriculture and Crop Production, North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, sh. Podbelsky, 7, Saint-Petersburg, Russian Federation, 196608, e-mail: n-wcirpfm@spcras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6903-6971>

✉ – Для контактов / Corresponding author