



Научная статья
УДК632.937.15:633.491
doi: 10.55186/25876740_2025_68_5_647

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНТОМОПАТОГЕННЫХ НЕМАТОД И ИХ СИМБИОТИЧЕСКИХ БАКТЕРИЙ В СИСТЕМЕ ЗАЩИТЫ КАРТОФЕЛЯ ОТ БОЛЕЗНЕЙ И ВРЕДИТЕЛЕЙ В РАЗНЫХ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ РОССИИ

З.П. Котова¹, Л.Г. Данилов², Т.А. Данилова¹, Ю.А. Тюкалов¹

¹Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

Аннотация. Лабораторные и полевые исследования, проведенные в 2023-2024 гг. были направлены на изучение патогенности энтопатогенных нематод (ЭПН) семейства *Steinernematidae* и их симбиотических бактерий *Xenorhabdus nematophila* и *Xenorhabdus bovienii* на вредителей (жуки-щелкуны) и возбудителей болезней картофеля (парши, ризоктониоза, фитофтороза) в условиях Северо-Запада и республики Карелия. В результате сравнительного анализа антибиотической активности симбиотических бактерий, проведенного на основе измерения зон ингибирования *in vitro*, было выявлено, что все исследуемые штаммы бактерий проявляют активность против *Rhizoctonia solani*. Наилучшие результаты продемонстрировал штамм *X. nematophilus*, являющийся симбионтом нематод вида *S. carpocapsae*, его эффективность составила 45%. Иммунологическая оценка устойчивости к заболеваниям после уборки клубней показала, что биологический препарат Немабакт и симбиотические бактерии нематод *X. bovienii* наиболее эффективно защищают клубни от основных болезней и проволочника во время вегетации. Против парши обыкновенной лучший результат показал Немабакт при обработке клубней перед посадкой, полностью подавляя развитие патогена (100%). Сочетание Немабакта с симбионтами нематод *S. feltiae protense* снизило поражённость клубней на 59%. Для борьбы с ризоктониозом также эффективными оказались Немабакт и его комбинация с симбионтами *X. bovienii*, снижая поражение клубней на 95-100%. Для защиты от проволочника наиболее действенным (на уровне химического контроля) был бактериальный препарат Немабакт, его эффективность составила 59%. Анализ продуктивности показал, что применение исследуемых средств защиты позволило увеличить урожайность картофеля на 20-46%. Наибольший прирост урожая клубней был достигнут при использовании симбионтов нематод *S. feltiae protense*.

Ключевые слова: энтомопатогенные нематоды, картофель, парша, ризоктониоз, фитофтороз, проволочник

Благодарности: исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (№ 24-26-20029) и Санкт-Петербургского научного фонда.

Original article

THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF ENTOMOPATHOGENIC NEMATODES AND THEIR SYMBIOTIC BACTERIA IN THE POTATO PROTECTION SYSTEM AGAINST DISEASES AND PESTS IN DIFFERENT AGRO-CLIMATIC ZONES OF RUSSIA

Z.P. Kotova¹, L.G. Danilov², T.A. Danilova¹, Yu.A. Tyukalov¹

¹North-Western Center for Interdisciplinary Food Security Researcher of Problems of Food Maintenance, St. Petersburg, Pushkin, Russia

²All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Pushkin, Russia

Abstract. Laboratory and field studies conducted in 2023-2024. They were aimed at studying the pathogenicity of the entomopathogenic nematodes (EPN) of the *Steinernematidae* family and their symbiotic bacteria *Xenorhabdus nematophila* and *Xenorhabdus bovienii* for pests (pounds) and causative agents of potato diseases (steamers, risononosis, and risononosis. phytoftorosis) in the conditions of the North-West and the Republic of Karelia. As a result of a comparative analysis of the antibiotic activity of symbiotic bacteria carried out on the basis of measuring the inhibition zones *in vitro*, it was revealed that all the studied strains of bacteria show activity against *Rhizoctonia solani*. The best results were demonstrated by the strain of *X. nematophilus*, which is the symbiont of the nematode of the type *S. carpocapsae*, its effectiveness was 45%. The immunological assessment of resistance to diseases after cleaning tubers showed that the biological drug NemaBakt and the symbiotic bacteria of nematodes *X. bovienii* most effectively protect tubers from the underlying diseases and wires during the vegetation. Against the sounds ordinary, the best result was shown by NemaBakt when processing tubers before planting, completely suppressing the development of pathogen (100%). The combination of NemaBakt with symbiontes of nematodes *S. feltiae protense* reduced the affection of tubers by 59%. To combat rhizoctoniosis, NemaBakt and its combination with *X. bovienii* symbiontes were also effective, reducing the damage to tubers by 95-100%. To protect against the wireworm, the most effective (at the level of chemical control) was the bacterial drug NemaBakt, its effectiveness was 59%. Analysis of productivity showed that the use of the studied drugs made it possible to increase potato yield by 20-46%. The largest growth in the harvest of tubers was achieved when using *S. feltiae protense* Symbiontes.

Keywords: entomopathogenic nematodes, potato, scab, rhizoctoniosis, late blight, wireworm

Acknowledgments: the study was carried out at the expense of the Russian Scientific Fund (No. 24-26-20029) and the St. Petersburg Scientific Fund.

В мире биологические пестициды занимают лишь небольшую долю (около 3-4 млрд долларов) от общего рынка ядохимикатов, который оценивается в 61,3 млрд долларов США. Однако их производство по сравнению с химическими

аналогами растёт быстрее и составляет ежегодно 10-20%. В настоящее время использование микроорганизмов, в том числе и энтомопатогенных нематод (ЭПН), в биологической борьбе с насекомыми-вредителями и болезнями

существенно расширилось, и приобретает особую значимость в современном сельскохозяйственном производстве [1-4]. Энтомопатогенные нематоды семейств *Steinernematidae* и их симбиотические бактерии в последние годы



широко изучаются во всем мире как агенты микробиологического контроля численности насекомых вредителей и возбудителей заболеваний растений. Инвазионные личинки нематод, активно проникая в тело насекомых, выпускают в его гемолимфу симбиотических бактерий, которые убивают насекомое и способствуют развитию и размножению нематод в теле насекомого. Бактерии быстро размножаются и производят комплекс метаболитов, преодолевая иммунную систему насекомых, приводя их к гибели и подавляя рост различных грибных и бактериальных возбудителей заболеваний внутри тела погибшего насекомого [5-8].

Антибиотикоактивные жидкие культуры штаммов *Xenorhabdus* эффективны против широкого спектра вредителей растений от бактерий до грибов, простейших и насекомых. В связи с этим весьма актуальны исследования по разработке экологически безопасных технологий защиты растений картофеля от вредных организмов с использованием симбиотических бактерий ЭПН и продуктов их метаболизма.

К числу наиболее вредоносных вредителей, приносящих серьезный урон клубням картофеля, относятся жуки-щелкуны из семейства *Elateridae*, из отряда жесткокрылых *Coleoptera*. Они питаются клубнями, прогрызая в них ходы, и тем самым снижают не только товарность, но и урожайность картофеля. Производители картофеля борются с этими вредителями с помощью различных сертифицированных синтетических инсектицидов, однако их выбор зачастую ограничен по причине недостаточно высокой их эффективности. В качестве альтернативы можно использовать биологические полученные пестициды. Некоторые грамотрицательные протеобактерии, например, *Burkholderia* spp., содержат инсектицидные соединения. Однако их эффективность против жуков-щелкунов пока недостаточно изучена [1]. Биологические препараты, изготавливаемые на основе ЭПН, в основном предназначены для борьбы с различными стадиями развития насекомых, обитающих в почве, и в том числе против различных видов проволочника на картофеле. В них в качестве действующего начала выступают живые инвазионные личинки, которые, обитая в почве в отсутствие насекомого-хозяина, могут существовать не только в инактивированном состоянии без питания более двух лет, но и способны активно мигрировать на различную глубину под влиянием биотических и абиотических факторов среды [5]. Во Всесоюзном институте защиты растений в течение длительного времени осуществлялись исследования по изучению особенностей биологии, экологии и паразитической активности ЭПН в отношении 38 фитофагов, разработке технологий производства, применения и создания биопрепаратов (Немабакт и Энтонем-Ф) на основе энтомопатогенных нематод [9]. В настоящее время, в Государственном каталоге пестицидов представлен большой ассортимент препаратов разных химических классов для защиты посадок картофеля во второй половине вегетации от наземных вредителей [10], но для борьбы с проволочником зарегистрирован только один биологический препарат — Энтонем F на основе энтомопатогенной нематоды *Steinernema feltiae* [5, 11]. Необходимо учитывать и то, что в основу защиты картофеля от болезней должны быть положены также профилактические мероприятия, с которыми сочетаются истребительные приемы.

Это связано с необходимостью воздействия на патогены не только в период их активизации, но и в фазах депрессии и начала расселения [12-14].

Таким образом, изучение возможностей использования биоразнообразия полезных микроорганизмов весьма актуально для решения проблемы увеличения ассортимента биопрепаратов и создания новых полифункциональных препаратов на основе энтомопатогенных нематод сем. *Steinemematidae* и их симбиотических бактерий *Xenorhabdus* spp. в качестве средств защиты картофеля от насекомых вредителей и возбудителей заболеваний. Актуальной задачей является и их практическое использование в органическом земледелии с целью получения качественного урожая и обеспечения биопродуктивности агроэкосистем региона.

В результате проведенных ранее исследований продуктов метаболизма этих же изолятов в отношении грибов-возбудителей заболеваний растений (*F. culmorum*, *F. solani* u *A. solani*) было установлено, что наибольшей антибиотической активностью при температуре 20°C обладает штамм бактерии-симбионтов нематод вида *S. feltiae protense* [15]. Таким образом, целью исследований было изучение патогенности видов и штаммов энтомопатогенных нематод сем. *Steinemematidae* и симбиотических бактерий *Xenorhabdus* spp. *in vitro* и оценка их эффективности в полевых условиях в качестве средств защиты картофеля от вредителей и болезней для создания новых полифункциональных препаратов в системе биологической защиты культуры.

Методика исследований. Лабораторные и полевые исследования проводились в 2023-2024 годах. Лабораторные — на базе Всероссийского Института защиты растений (г. Пушкин). Виды и штаммы симбиотических бактерий, используемые в экспериментах, были получены путем заражения гусениц большой вошковой моли (*Galleriamellonella*) видами нематод *S. carpocapsae*, *S. feltiae* u *S. feltiae protense*. Трупы погибших от заражения нематодами насекомых поверхностно стерилизовали в 70% спирте в течение 2 мин. и помещали для сушки в ламинарный поток воздуха в течение 3 мин. Затем из 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 Акюрста [16]. 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 3-х кратной повторности. Чистые культуры симбиотических бактерий размножаются в колбах, либо в ферментерах по методике, разработанной Даниловым с соавторами с последующим автоклавированием [17].

Полевые исследования проводились в двух агроклиматических зонах:

1 зона — Северо-Западная (Ленинградская плодовоовощная опытная станция института агроинженерных и экологических проблем (ИАЭП — филиал ФНАЦВМ, г. Павловск)

и 2 зона — Республика Карелия (Пряжинский район, д. Виданы, ЛПХ). Сорта картофеля: по 1 зоне — раннеспелый Чароит, по 2 зоне — среднеранний Ред Скарлетт.

Схема опытов включала пять вариантов:

1) биологический препарат Немабакт (суперспения бактерий, изготавливаемых на основе энтомопатогенных нематод вида *Steinernema carpocapsae* и симбиотических бактерий вида *Xenorhabdus nematophila*, титр 10^7 КОЭ/мл, автоклавированная культура;

2) автоклавированные культуры симбиотических бактерий вида *Xenorhabdus bovienii* — симбионтов созданных на основе энтомопатогенных нематод (ЭПН) вида *Steinernema feltiae protense*, при норме расхода нематод 500 тыс./м²; в первоначальных титрах бактериальных клеток — 10^7 КОЭ/мл;

3) совместное действие биологического препарата Немабакт и штамма симбиотических бактерий (*Xenorhabdus*) энтомопатогенных нематод сем. *Steinernematidae* (ЭПН);

4) в качестве химического контроля был выбран инсекто-фунгицидный протравитель для обработки клубней картофеля против грызунов и сосущих вредителей (в т.ч. почвообитающих), а также некоторых болезней, химический препарат Престиж, КС (действующее вещество: имидаклоприд+пенцикурон, содержание действующего вещества: 140+150 г/л, химический класс: неоникотиноиды + мочевины);

5) контроль — обработка клубней (вода). Обработки клубней осуществляли перед посадкой и поверхности почвы в фазу бутонизации. Площадь опытной делянки — 3 м² (1,5х2 м), повторность в опыте 4-х кратная, размещение вариантов систематическое. Учет урожая — сплошным весовым методом. Структуру урожая рассчитывали по 5-ти растениям.

Статистическая обработка проведена с применением программы Excel и Statgraphic. Оценку эффективности изучаемых средств защиты растений рассчитывали путем сравнения процента поражения клубней болезнью или вредителем в опытном и контрольном вариантах после уборки клубней по формуле:

$$БЭ = \frac{R_k - R_0}{R_k} \cdot 100\% \quad (1)$$

где: БЭ — биологическая эффективность, %;

Rk — поражение клубней болезнью или вредителем в контрольном варианте, %;

Ro — поражение клубней болезнью или вредителем, %.

Агрохимическая характеристика участков: 1 зона — почва дерново-подзолистая средне-суглинистая глееватая, кислотность pH_{кон.} 6,2, содержание органического вещества 6,6%, подвижного фосфора (P₂O₅) 1304 мг/кг и калия (K₂O) 269 мг/кг; 2 зона — почва дерново-подзолистая легкосуглинистая, кислотность pH_{кон.} 5,1, содержание органического вещества 3,9%, подвижного фосфора (P₂O₅) — 250 мг/кг, калия (K₂O) — 168 мг/кг почвы. Технология выращивания картофеля общепринятая для регионов и включала посадку 20-22 мая в нарезанные борозды по схеме 70х25 см с густотой посадки клубней 57, тыс.шт./га. Перед посадкой проведена культивация на 15-16 см и выравнивание поля. Во время вегетации были проведены послевсходовое боронование и 2 окучивания. Уборка делянок проводилась одновременно. Применяемая в опытах агротехника — общепринятая для регионов. Основную уборку проводили на всех сортах одновременно после скашивания ботвы.



Результаты исследований и обсуждение.

Лабораторные исследования *in vitro* были направлены на выявление наиболее эффективного штамма симбиотических бактерий — симбионтов против опасного вредителя картофеля гриба *Rhizoctonia solani* Kühn (рис. 1).

Как видно из рисунка 1 при сравнении антибиотической активности симбиотических бактерий на рост мицелия грибов показала, что изучаемые штаммы бактерий, подавляли рост склеротия *Rhizoctonia solani*. Наибольшее ингибирование зоны роста гриба при температуре 25°C отмечено на 5-е и 7-е сутки у метаболитов штамма *S. carpocapsae* и составило 11,5±1,0 мм и 14,3±1,02 мм, соответственно (рис. 1). Эффективность действия симбионта составила 45% против контрольного варианта.

На основании сравнительной оценки антибиотической активности симбиотических бактерий по зоне ингибирования установлено, что все штаммы бактерий, используемые в опыте, показали антибиотическую активность в отношении *Rhizoctonia solani*, при этом наилучшие показатели были у штамма *X. nematophilus* — симбионта нематод вида *S. carpocapsae*. Полученные результаты лабораторных опытов послужили основанием для их проверки в полевых условиях в качестве альтернативы химическим пестицидам и возможной замены в биологизированных системах защиты картофеля в различных агроклиматических условиях.

Полевые исследования. Агрометеорологические условия полевого сезона 2024 г. в целом были благоприятные для выращивания картофеля в обеих зонах, однако существенно различались между собой. Гидротермический коэффициент (ГТК) вегетационного периода по 1 зоне составил 1,28 и характеризовался как слабо засушливый, а по 2 зоне соответственно как избыточно увлажненный с ГТК 1,88.

Из представленных графиков на рисунке 2 видно, что среднесуточные температуры воздуха, особенно на начальном этапе развития были различны. Характерной особенностью вегетационного периода 1 зоны был недостаток влаги в период всходов. Во все месяцы вегетации среднесуточная температура воздуха была выше средней многолетней, особенно это проявилось в мае и июле (рис. 2, а). Осадков выпало значительно меньше нормы — на 30%. Засушливые погодные условия второй и третьей декады июня вызвали частичное опадание бутонов и цветков. Во время вегетации было отмечено развитие фитофтороза по листьям. Первые признаки были отмечены 25 июня в фазу начала бутонизации. По 2 зоне средняя температура и осадки во время фазы вегетации посадки — всходы отмечены выше средних многолетних значений на 4,3°C и 54,6 мм, соответственно (рис. 2, б). Из-за сухой и жаркой погоды августа развитие фитофтороза не отмечалось.

Во время основных фаз развития картофеля было произведено измерение высоты растений, количества стеблей. Результаты измерений показали, что по 1 зоне предпосадочная обработка клубней раннего сорта картофеля достоверно увеличивала высоту растений. Наиболее выраженным эффектом обладала суспензия симбиотических бактерий вида *X. bovienii*, обработка которой стимулировала рост растений на 11-18%. Совместное применение Немабакта и суспензии симбиотических бактерий вида *X. bovienii* при обработке клубней, увеличивало высоту

растений на 5-16%. Подсчет количества стеблей в фазу цветения показал, что на скороспелом сорте Чароит все исследуемые биологические средства защиты положительно повлияли на

этот показатель. Обработка клубней как отдельно симбиотическими бактериями *X. bovienii*, так и совместно с Немабактом увеличивала количество стеблей до 28% (табл. 1).

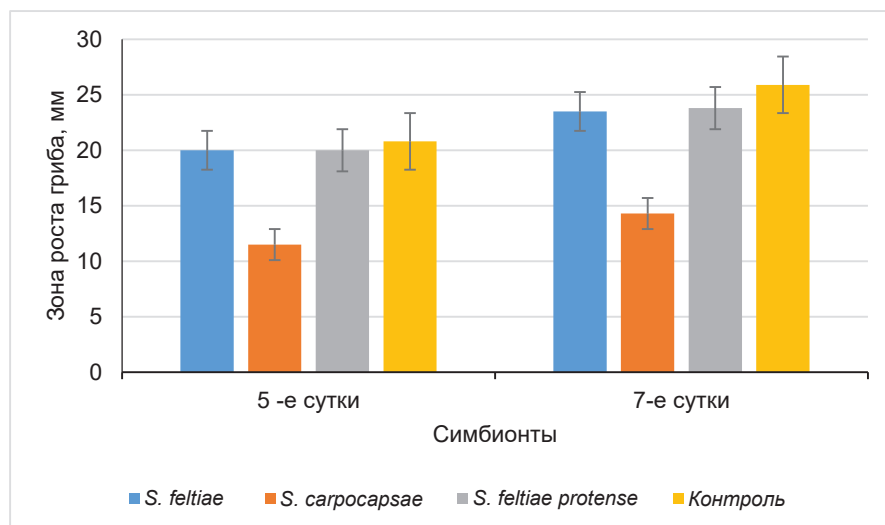


Рисунок 1. Антибиотическая активность штаммов симбиотических бактерий энтомопатогенных нематод против гриба *Rhizoctonia solani* Kühn

Figure 1. Antibiotic activity of strains of symbiotic bacteria of entomopathogenic nematodes against the fungus *Rhizoctonia solani* Kühn

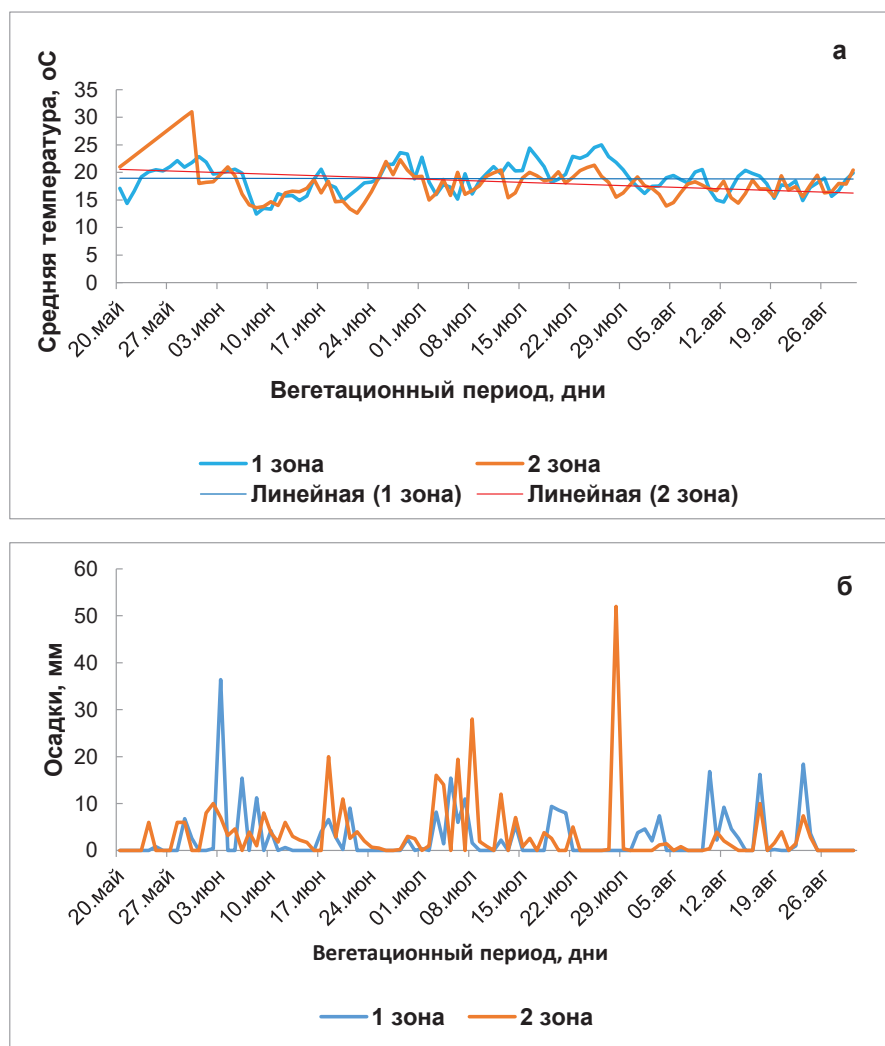


Рисунок 2. Среднесуточная температура воздуха (а) и осадков (б) за вегетационный период двух агроклиматических зон, по данным электронного ресурса: <http://rp5.ru/>

Figure 2. Average daily air temperature (a) and precipitation (b) during the growing season of two agro-climatic zones, according to the electronic resource: <http://rp5.ru/>





Несколько иные результаты биометрических измерений были получены по 2 зоне у средне-раннего сорта картофеля Ред Скарлетт. Во время фазы полные всходы существенно ниже контроля были варианты с обработкой клубней препаратами Немабакт (12%) и совместно Немабакт с симбиотическими бактериями *X. bovienii* (7%), (табл. 1). Применение препарата Престиж способствовало увеличению высоты растений на начальной стадии развития растений на 3%, по сравнению с контролем. Однако, измерение высоты растений уже в фазе цветения показало, что обработка клубней ЭПН и симбиотическими бактериями *X. bovienii* достоверно увеличивала этот показатель на 12% и 6%, соответственно. При подсчете количества стеблей все исследуемые биологические образцы положительно повлияли на этот показатель, но достоверных различий по сравнению с контрольным вариантом не выявлено.

Таким образом, различное влияние продуктов метаболизма симбиотических бактерий на биометрические показатели в различных зонах вероятно связано со скоростью сортов и их биологическими особенностями: сорт Чароит, отличается ультраскороспелостью, в отличие от среднераннего сорта Ред Скарлетт, имеющего более длительный период прорастания и вегетации.

Иммунологическая оценка по устойчивости картофеля к болезням, проведенная после уборки клубней, показала, что исследуемые биологические средства защиты эффективны в ограничении развития различных видов патогенов. Сухая и теплая погода 1 зоны не способствовала развитию ризиктониоза на клубнях, а во 2 зоне поражение клубней этим заболеванием было значительным (от 1,7% до 25,3%). Против ризиктониоза по 2 зоне наиболее эффективным были энтомопатогенные нематоды, применение которых позволило снизить поражение клубней на 95% по сравнению с контрольным вариантом (табл. 2). Применение чистой культуры симбиотических бактерий энтомопатогенных нематод и их совместное сочетание с Немабактом также способствовало снижению пораженности клубней ризиктониозом на 69% по сравнению с контрольным вариантом.

Против парши обыкновенной по 1 зоне выращивания наиболее эффективными были обработки ЭПН и продуктами метаболизма симбиотических бактерий *X. bovienii* и химическим препаратом Престиж (100%). Сочетание Немабакта и симбионтов нематод *S. feltia* — *X. bovienii* позволило снизить пораженность клубней паршой обыкновенной лишь на 50% по сравнению с контрольным вариантом. Во 2 зоне против парши обыкновенной наиболее эффективными были ЭПН *Steinernema carpocapsae* и их сочетание с симбионтами нематод *S. feltia* — *X. bovienii*, совместное применение которых позволило снизить пораженность клубней на 100% и 59% по сравнению с контролем, соответственно.

Агрометеорологические условия вегетации влияли на вредоносность личинок жуков-щелкунов на клубнях, как в первой, так и во второй зонах. Наибольшее количество клубней с тремя ходами и более были отмечены в контрольных вариантах: для 1 зоны — 29,3%, для 2 зоны — 13,6%. Результаты клубневого анализа показали, что наибольшее снижение поврежденности клубней картофеля раннего сорта в 1 зоне, при применении препарата Престиж составляло

64%. На уровне химического препарата, был бактериальный препарат Немабакт, его эффективность составила 59% против контрольного варианта (табл. 3).

В условиях 2 зоны было отмечено, что биологический препарат Немабакт был малоэффективным против проволочника, на уровне контроля (13,2%). Мы связываем это с тем, что у энтомопатогенных нематод вида *S. carpocapsae* Weiser штамм «agrotos» на суглинистой почве заметно снижается интенсивность заражения с увеличением глубины локализации хозяина. Максимальная интенсивность инвазии наблюдается у *Steinernema carpocapsae* на глубине 5 см. Причем, экспериментально

доказано, что при понижении температуры почвенного слоя активность нематод резко падает [19]. Поэтому, именно этим и объясняется действие препарата Немабакт в условиях вегетации этого года. В противоположность *S. carpocapsae* симбионты энтомопатогенных нематод вида ЭПН *S. feltiae protense* — *X. bovienii* обладают высокой инвазионной активностью при относительно низких температурах и активно мигрируют по почвенному профилю. Таким поведением симбионтов *S. feltiae protense* как отдельно, так и совместно с препаратом Немабакт получена более высокая эффективность в отношении проволочника, на 12% и 19% выше контроля, соответственно.

Таблица 1. Влияние раздельного и совместного внесения симбиотических бактерий ЭПН на биометрические показатели растений картофеля в различные фазы развития (среднее по вариантам)
Table 1. The effect of separate and joint introduction of symbiotic EPN bacteria on biometric indicators of potato plants in various phases of development (average by options)

Вариант опыта	Фаза полных всходов		Фаза цветения			
	1 зона	2 зона	1 зона	2 зона	1 зона	2 зона
Немабакт	15,0* 4,8**	27,7 -12	39,2 6,8	49,1 12	3,6*** 20,3	2,6 13
<i>X. bovienii</i>	16,2 13,8	30,6 -3	40,6 10,7	46,4 6	3,8 27,0	2,6 13
Немабакт + <i>X. bovienii</i>	15,3 7,2	29,4 -7	38,5 4,9	43,5 0	3,8 28,4	2,4 1
Престиж	14,8 4	32,4 3	38,2 4	44,1 1	3,4 14,9	3,0 27
Контроль	14,3	31,5	36,7	43,7	3,0	2,3
HCP ₉₅	1,1	1,53	0,82	2,96	0,31	1,38

* высота, см; **% от контроля; *** побеги, шт./растение

Таблица 2. Влияние раздельного и совместного применения ЭПН и симбиотических бактерий на пораженность клубней картофеля основными заболеваниями
Table 2. The influence of separate and joint use of EPN and symbiotic bacteria on the affection of potato tubers with the main diseases

Препарат	Зона	Ризиктониоз		Фитофтороз		Парша обыкновенная	
		поражен-ных клубней, %	% от контроля, ±	поражен-ных клубней, %	% от контроля, ±	поражен-ных клубней, %	% от контроля, ±
Немабакт	1	0,0	0,0	0,0	-100	0,0	-100
	2	1,7	-95	0,0	-	0,0	-100
<i>X. bovienii</i>	1	0,0	0,0	0,0	-100	0,0	-100
	2	10,9	-69	0,0	-	6,6	-20
Немабакт + <i>X. bovienii</i>	1	0,0	0,0	4,4	-12	1,0	-50
	2	11,0	-69	0,0	-	3,4	-59
Престиж	1	0,0	0,0	4,8	-4	0,0	-100
	2	25,3	-29	0,0	-	9,3	12
Контроль	1	0,0	0,0	5,0	-	2,0	-
	2	35,6	-	0,0	-	8,3	-

Таблица 3. Влияние раздельного и совместного применения ЭПН и симбиотических бактерий на пораженность клубней картофеля проволочником, (%)
Table 3. The effect of separate and joint use of EPN and symbiotic bacteria on the affection of tubers of potatoes with a wireworm, (%)

Препарат	1 зона		2 зона	
	> 3 ходов	% от контроля, ±	> 3 ходов	% от контроля, ±
Немабакт	12,1±2,86*	-58,8	13,2±4,08	-3,2
<i>X. bovienii</i>	19,8±4,17	-32,3	12,0±0,54	-12,0
Немабакт + <i>X. bovienii</i>	16,6±1,56	-43,3	11,0±0,64	-19,2
Престиж	10,4±2,03	-64,5	13,4±2,84	-1,7
Контроль	29,3±5,75	-	13,6±4,54	-
HCP ₉₅	1,89		1,08	

*среднее отклонение



Таблица 4. Урожайность клубней в разных агроэкологических зонах в зависимости от раздельного и совместного внесения ЭПН и симбиотических бактерий (2024 г.)

Table 4. The yield of tubers in different agroecological zones depending on separate and joint introduction of EPN and symbiotic bacteria (2024)

Препарат	1 зона			2 зона		
	т/га	отклонение от контро-ля, т/га ±	%, ±	т/га	отклонение от контро-ля, т/га ±	%, ±
Немабакт	28,13	-1,28	-4,4	23,36	+3,97	+20,5
<i>X. bovienii</i>	29,06	-0,35	-1,2	28,27	+8,88	+45,8
Немабакт + <i>X. bovienii</i>	27,11	-2,30	-7,8	23,34	+3,95	+20,4
Престиж	30,42	+1,01	+3,4	23,84	+4,45	+23,0
Контроль	28,13	-	-	19,39	-	-
НСП ₀₅	0,54	-	-	0,95	-	-

Именно таким поведением энтомопатогенных нематод и их симбионтов подтверждается полученный урожай клубней, как конечный результат выращивания культуры (табл. 4). Анализ продуктивности картофеля по двум зонам показал, в условиях Северо-Западной зоны (зона 1) урожай клубней в среднем на 22% был выше, чем в условиях Карелии (зона 2).

По 1 зоне применение Немабакта и его сочетания с симбионтами *X. bovienii* не способствовало увеличению урожая клубней. На уровне контрольного варианта было опрыскивание клубней симбионтами *X. bovienii* — 29,06 т/га. Анализ продуктивности картофеля во 2 зоне показал, что все исследуемые биологические препараты увеличивали урожайность клубней на 20-46% по сравнению с контрольным вариантом (табл. 4). Наибольшая достоверная прибавка урожайности была получена при применении симбионтов энтомопатогенных нематод *S. feltiae* — *X. bovienii*.

Таким образом, в процессе исследования нами выявлено, что применение энтомопатогенных нематод из родов *Steinernematidae* и их симбиотические бактерии являются мощными микробиологическими средствами борьбы, которые широко используются для борьбы с экономически важными болезнями и вредителями. Эффективность биоконтроля зависит как от абиотических, так и от биотических факторов и может быть повышена за счет полифункционального использования ЭПН и их симбиотических бактерий. Достижения в этих областях позволяют расширить возможности использования энтомопатогенных нематод в различных системах земледелия [19, 20].

Выводы. Оценка эффективности применения различных средств биологической защиты картофеля от возбудителей различных заболеваний (ризиктониоза, фитофтороза, парши) и вредителей (жуки-щелкуны) в условиях Севера и Северо-Запада России позволила сделать следующие выводы.

- в лабораторных опытах максимальное ингибирование гриба *Rhizoctonia solani* Kuhn достигается при температуре 25°C (*in vitro*) при использовании штамма *X. nematophilus* — симбионта нематод вида *S. carpocapsae*. Эффективность действия симбионта составила 45%.
- в полевых условиях при более низких температурах наибольшую эффективность обеспечивают бактерии *X. bovienii*, подтверждая при этом результаты ранних исследований [21].
- иммунологическая оценка по устойчивости картофеля к болезням, проведенная после уборки клубней, показала, что наиболее

эффективным средством против основных заболеваний и проволочника на клубнях картофеля во время вегетации было совместное применение биологического препарата Немабакт и симбиотических бактерий нематод — *X. bovienii*;

- наиболее эффективным средством против парши обыкновенной была полифункциональная обработка клубней при посадке препаратом Немабакт, применение которого полностью подавляло патоген (100%), а также его сочетание с симбионтами энтомопатогенных нематод *S. feltiae protense*, применение которых снижало пораженность клубней на 59%;
- против ризиктониоза наиболее эффективным был также эффективен препарат Немабакт и его полифункциональное использование с симбионтами *X. bovienii*, что позволило снизить поражение клубней на 95-100%;
- наиболее эффективным средством против жуков-щелкунов были бактериальный препарат Немабакт и химический препарат Престиж, их эффективность составила 59% и 64%, соответственно;
- анализ продуктивности картофеля показал, все исследуемые средства защиты растений способствовали увеличению урожайности клубней на 20-46%. Наибольшая прибавка урожая была получена при применении симбионтов энтомопатогенных нематод вида *S. feltiae protense*.

Список источников

- Pagani M.K., Johnson T.B., Doughty H.B., McIntyre K., Kuhar T.P. *Coleoptera* spp.-based biopesticide controls wire worms (*Burkholderia elateridis*) in potatoes // Journal of Economic Entomology. 2023. Vol. 116. No. 5. Pp. 1934-1938. DOI: 10.1093/jeet/toad146
- Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Стариков П.А., Горностаева Е.А., Ашихмина Т.Я. Микробы-антагонисты против фитопатогенных бактерий и грибов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 6-14. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-006-014.
- Ayaz M., Li C.H., Ali Q., Zhao W., Chi Y.K., Shafiq M., Ali F., Yu X.X., Yu Q., Zhao J.T., Yu J.W., Qi R.D., Huang W.K. Bacterial and Fungal Biocontrol Agents for Plant Disease Protection: Journey from Lab to Field, Current Status, Challenges, and Global Perspectives. *Molecules*. 2023. Vol. 28. No. 18. Pp. 6735. DOI: 10.3390/molecules28186735.
- Хайруллин Р.М., Сорокань А.В., Габдрахманова В.Ф., Максимов И.В. Перспективные свойства *Bacillus thuringiensis* и направления их использования для защиты растений // Прикладная биохимия и микробиология. 2023. Т. 59. № 4. С. 337-354. DOI: 10.31857/S0555109923040074.

5. Данилов Л.Г., Павлюшин В.А. Состояние, перспективы изучения и практического использования энтомопатогенных нематод (*Steinernematidae*) и их симбиотических бактерий (*Xenorhabdus*) против насекомых и возбудителей заболеваний растений // Вестник защиты растений. 2015. Т. 85. № 3. С. 10-15.

6. Wright P.J. Morphological characterisation of the entomogenous nematodes *Steinernema* spp. and *Heterorhabditis* spp. (Nematoda: *Rhabditida*) // New Zealand Journal of Zoology. 1990. Vol. 17. No 4. Pp. 577-585.

7. Boemare N., Gaugler R. (ed.) Biology, Taxonomy and Systematics of *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*. In book: Entomopathogenic nematology. CABI Publishing, CAB International. 2002. Pp. 35-56.

8. 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. Т. 100. № 2. С. 52-55.

9. Данилов Л.Г. Немабакт и энтонем-ф-биологические препараты на основе энтомопатогенных нематод // Овощеводство и тепличное хозяйство. 2008. № 12. С. 43.

10. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации, Часть I Пестициды. Москва. 2023. 804 с.

11. Данилов Л.Г., Айрапетян В.Г., Салатов Ю.П., Салатов Л.Ю. Способ получения препаративной формы для хранения энтомопатогенных нематод семейств *Steinernematidae* и *Heterorhabditidae*. 2004. Патент на изобретение RU 2225107.

12. Иванюк В.Г., Банадышев С.А., Журомский Г.К. Защита картофеля от вредителей, болезней и сорняков. Минск. Белпринт. 2005. 696 с.

13. Воловик А.С., Шнейдер А.С. Состояние и перспективы защиты картофеля от грибных и бактериальных болезней. Научные труды: «Защита картофеля от болезней и вредителей». М., 1984. С. 70.

14. Dreyer J., Malan A.P., Dicks L.M.T. Bacteria of the Genus *Xenorhabdus*, a Novel Source of Bioactive Compounds. *Front. Microbiol.* 2018. Vol. 9. pp. 3177. DOI: 10.3389/fmicb.2018.03177.

15. Котова З.П., Данилов Л.Г. Определение фитотоксичности симбиотических бактерий (*Xenorhabdus bovienii*) энтомопатогенных нематод на начальных этапах развития *Solanum Lycopersicum* MILL // Journal of Agriculture and Environment. 2025. Т. 3. № 55. DOI: 10.60797/JAE.2025.55.3.

16. 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. VOL. 21. No 2. Pp. 303-309.

17. Данилов Л.Г., Нащекина Т.Ю., Зорина Е.А. Способ получения массовой культуры симбиотических бактерий (*Xenorhabdus*) энтомопатогенных нематод (*Rhabditida*: *Steinernematidae*). Патент на изобретение. 2021. U 2748023.2021.

18. Данилов Л.Г. Биологические основы применения энтомопатогенных нематод (*Rhabditida*: *Steinernematidae*, *Heterorhabditidae*) в защите растений. Автореф. доктор. дисс. С. Петербург. 2001. 46 с.

19. Shapiro Ian D.I., Hazi S., Glazer I. Basic and applied research: Entomopathogenic nematodes. IN: Lacey, L.A. (Ed.), Microbial Agents for Control of Insect Pests: from discovery to commercial development and use. Academic Press, Amsterdam. 2017. pp. 91-105.

20. Fodor A., Hess C., Ganas P., Boros Z., Kiss J., Makrai L., Dublec K., Pál L., Fodor L., Sebestyén A., Klein M.G., Tarasco E., Kulkarni M.M., McGwire B.S., Vellai T., Hess M. Antimicrobial Peptides (AMP) in the Cell-Free Culture Media of *Xenorhabdus budapestensis* and *X. szentirmai* Exert Anti-Protist Activity against Eukaryotic Vertebrate Pathogens including *Histomonas meleagridis* and *Leishmania Donovan* Species.





Antibiotics (Basel). 2023. Vol. 12. No 9. Pp. 1462. DOI: 10.3390/antibiotics12091462.

21. Котова З.П., Данилова Т.А., Данилов Л.Г., Архипов М.В. Перспективы применения различных видов и штаммов симбиотических бактерий (*Xenorhabdus* spp.) в биологической защите картофеля от болезней в условиях Европейского Севера России // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25. № 3. С. 395–406. doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406

References

- Pagani M.K., Johnson T.B., Doughty H.B., McIntyre K. & Kuhar T.P. (2023). Burkholderiaspp.-based biopesticide controls wire worms (*Coleoptera: Elateridae*) in potatoes. *Journal of Economic Entomology*, vol. 116, no. 5, pp. 1934-1938. DOI: 10.1093/jee/toad146.
- Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Starikov P.A., Gornostaeva E.A. & Ashikhmina T.Ya. (2022). *Mikroby – antagonisty protiv fitopatogenny'x bakterij i gribov (obzor)* [Microbes-antagonists against of phytopathogenic bacteria and fungi (review)]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, no. 2, pp. 6-14. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-006-014.
- Ayaz M., Li C.H., Ali Q., Zhao W., Chi Y.K., Shafiq M., Ali F., Yu X.Y., Yu Q., Zhao J.T., Yu J.W., Qi R.D. & Huang W.K. (2023). Bacterial and Fungal Biocontrol Agents for Plant Disease Protection: Journey from Lab to Field, Current Status, Challenges, and Global Perspectives. *Molecules*, vol. 28, no. 18, pp. 6735. DOI: 10.3390/molecules28186735.
- Khairullina R.M., Sorokana A.V., Gabdrakhmanova V.F. & Maksimova I.V. (2023). *Perspektivny'e svoystva Bacillus thuringiensis i napravleniya ix ispol'zovaniya dlya zashchity rastenij* [The Perspective Properties and the Directions of *Bacillus thuringiensis* Use for Plant Protection]. *Prikladnaya bioximiya i mikrobiologiya*, vol. 59, no. 4, pp. 337-354. DOI: 10.31857/S0555109923040074.
- Danilov L.G. & Pavlushin V.A. (2015). *Sostoyanie, perspektivy izucheniya i prakticheskogo ispol'zovaniya e'ntomopatogenny'x nematod (Steinernematidae) i ix simbioticheskikh bakterij (Xenorhabdus) protiv nasekomy'x i vzbuditelej zabolevaniy rastenij* [The state, prospects of studying and practical use of entomopathogenic nematodes (*Steinernematidae*) and their symbiotic bacteria (*Xenorhabdus*) against insects and plant pathogens]. *Vestnik zashchity rastenij*, vol. 3, pp. 10-15.
- Wright P.J. (1990). Morphological characterisation of the entomogenous nematodes *Steinernema* spp. and *Heterorhabditis* spp. (*Nematoda: Rhabditida*). *New Zealand Journal of Zoology*, vol. 17, no. 4, pp. 577-585.

7. Boemare N. & Gaugler R. (ed.). (2002). In book: Entomopathogenic nematology. Biology, Taxonomy and Systematics of *Photorhabdus* and *Xenorhabdus*, CABI Publishing, CAB International, pp. 35-56.

8. Danilov L.G. & Pavlyushin V.A. (2019). *Razrabotka i realizatsiya innovatsionnogo proekta po sozdaniyu opy'tnogo proizvodstva biologicheskikh preparatov na osnove e'ntomopatogenny'x nematod* [Development and implementation of an innovative project to create pilot production of biological preparations based on entomopathogenic nematodes]. *Vestnik zashchity rastenij*, vol. 100, no. 2, pp. 52-55.

9. Danilov L.G. (2008). *Nemabakt i e'ntonem-f – biologicheskiespreparaty naosnov'e e'ntomopatogenny'x nematod* [Nemabakt and entonem-f — biological preparations based on entomopathogenic nematodes]. *Ovoshhevodstvo i teplichnoe khozyajstvo*, vol. 12, pp. 43.

10. *Gosudarstvenny'j katalog pesticidov i agrokhimikatov, razreshenny'x k primeneniyu na territorii Rossijskoj Federacii. Chast' I Pesticidy* [State catalog of pesticides and agrochemicals, approved for use in the territory of the Russian Federation. Part I Pesticides], 2023, Moscow, 804 p.

11. Danilov L.G., Ayrapetyan V.G., Salyatov Y.P. & Salyatov L.Y. (2004). *Sposob polucheniya preparativnoy formy dlya xraneniya e'ntomopatogenny'x nematod semejstva Steinernematidae i Heterorhabditidae* [Method of obtaining a preparative form for storage of entomopathogenic nematodes of the families *Steinernematidae* and *Heterorhabditidae*], *Patent na izobretenie* RU 2225107.

12. Ivanyuk V.G., Banadyev S.A. & Zhurmsky G.K. (2005). *Zashhitakartofelya o vreditel'nykh, boleznej i sornyakov* [Protect potatoes from pests, diseases and weeds], Minsk, Belpriint, 696 p.

13. Volovik A.S. & Shneider A.S. (1984). *Sostoyanie i perspektivy zashchity kartofelya ot gribny'x i bakterial'ny'x boleznej. Nauchny'e trudy: Zashhita kartofelya ot boleznej i vreditel'nykh* [The state and prospects of potato protection from fungal and bacterial diseases. Scientific works: Protection of potatoes from diseases and pests], Moscow, pp. 70.

14. Dreyer J., Malan A.P. & Dicks L.M.T. (2018). Bacteria of the Genus *Xenorhabdus*, a Novel Source of Bioactive Compounds. *Front. Microbiol.*, vol. 9, pp. 3177. DOI: 10.3389/fmicb.2018.03177.

15. Kotova Z.P. & Danilov L.G. (2025). *Opreделение fitotoksichnosti simbioticheskikh bakterij (Xenorhabdus bovienii)*

e'ntomopatogenny'x nematod na nachal'ny'x etapakh razvitiya Solanum Lycopersicum MILL [Determination of phytotoxicity of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus bovienii*) of entomopathogenic nematodes at the initial stages of development of *Solanum Lycopersicum* MILL]. *Journal of Agriculture and Environment*, vol. 3, no. 55. DOI: 10.60797/JAE.2025.55.3.

16. Akhurst R.J. (1980). Morphological and Functional Dimorphism in *Xenorhabdus* spp., Bacteria Symbiotically Associated with the Insect Pathogenic Nematodes *Neoaplectana* and *Heterorhabditis* Free. *Journal of General Microbiology*, vol. 121, no. 2, pp. 303-309.

17. Danilov L.G., Zorina E.A. & Nashchekina T.Y. (2021). *Sposob polucheniya massovoy kul'tury simbioticheskikh bakterij (Xenorhabdus) e'ntomopatogenny'x nematod (Rhabditida: Steinernematidae)* [Symbolically, the method of mass production of bacterial culture (*Xenorhabdus*) of entomopathogenic nematodes (*Rhabditida: Steinernematidae*)], *Patent na izobretenie* RU 2748023.

18. Danilov L.G. (2001). *Biologicheskiesnovny' primeneniya e'ntomopatogenny'x nematod (Rhabditida: Steinernematidae, Heterorhabditidae) v zashchite rastenij* [Biological bases of application of entomopathogenic nematodes (*Rhabditida: Steinernematidae, Heterorhabditidae*) in plant protection]. *Avtoferat doktorskoj dissertacii*, S. Peterburg 46 p.

19. Shapiro Ilan, D.I., Hazir, S. & Glazer, I. (2017). Basic and applied research: Entomopathogenic nematodes. IN: Lacey, L. A. (Ed.), *Microbial Agents for Control of Insect Pests: from discovery to commercial development and use*, Academic Press, Amsterdam, pp. 91-105.

20. Fodor A., Hess C., Ganas P., Boros Z., Kiss J., Makrai L., Dublec Z., Pál L., Fodor L., Sebestyén A., Klein M.G., Tarasco E., Kulkarni M.M., McGwire B.S., Vellai T. & Hess M. (2023). Antimicrobial Peptides (AMP) in the Cell-Free Culture Media of *Xenorhabdus budapestensis* and *X. szentirmai* Exert Anti-Protist Activity against Eukaryotic Vertebrate Pathogens including *Histomonas meleagridis* and *Leishmania donovani* Species. *Antibiotics (Basel)*, vol. 12, no. 9, pp. 1462. DOI: 10.3390/antibiotics12091462.

21. Kotova Z.P., Danilova T.A., Danilov L.G., Arkhipov M.V. (2024). *Perspektivy primeneniya razlichny'x vidov i shtamov simbioticheskikh bakterij (Xenorhabdus spp.) v biologicheskoy zashchite kartofelya ot boleznej v usloviyakh Evropejskogo Severa Rossii* [Prospects for the use of various species and strains of symbiotic bacteria (*Xenorhabdus* spp.) in the biological protection of potatoes from diseases in the European North of Russia]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, vol. 25, no. 3, pp. 395-406. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.3.395-406.

Информация об авторах:

Котова Зинаида Петровна, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, zinaida_kotova@mail.ru

Данилов Леонид Григорьевич, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологической защиты растений, Всероссийского института защиты растений, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3623-1081>, biodanlg@mail.ru

Данилова Татьяна Алексеевна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1919-0695>, danilovata2@bk.ru

Тюкалов Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела земледелия и растениеводства, Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2987-0806>, yuat@mail.ru

Information about the authors:

Zinaida P. Kotova, doctor of agricultural sciences, leading researcher of the department of agriculture and crop production, North-Western Center for Interdisciplinary Food Security Researcher of Problems of Food Maintenance, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, zinaida_kotova@mail.ru

Leonid G. Danilov, doctor of agricultural sciences, leading researcher of the laboratory of microbiological plant protection, All-Russian Research Institute of Plant Protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3623-1081>, biodanlg@mail.ru

Danilova Tatyana Alekseevna, candidate of agricultural sciences, leading researcher of the department of agriculture and crop production, North-Western Center for Interdisciplinary Food Security Researcher of Problems of Food Maintenance, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1919-0695>, danilovata2@bk.ru

Yury A. Tyukalov, candidate of technical sciences leading researcher of the department of agriculture and crop production, North-Western Center for Interdisciplinary Food Security Researcher of Problems of Food Maintenance, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2987-0806>, yuat@mail.ru