



Научная статья

УДК 635.21:632.937.651

doi: 10.55186/25876740_2023_66_6_619

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ МЕТАБОЛИЗМА СИМБИОТИЧЕСКИХ БАКТЕРИЙ (*XENORHABDUS BOVIENII*) ЭНТОМОПАТОГЕННЫХ НЕМАТОД В ЗАЩИТЕ КАРТОФЕЛЯ ОТ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ ЗАБОЛЕВАНИЙ

З.П. Котова¹, Л.Г. Данилов², Т.А. Данилова¹, Ю.А. Тюкалов¹¹Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения — обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия²Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты лабораторных и полевых исследований, проведенных в 2021-2022 гг., по изучению ингибирующего действия симбиотических бактерий *Xenorhabdus bovienii* энтомопатогенных нематод (сем. *Steinernematidae*) на возбудителей заболеваний картофеля (парша, ризоктониоз, фитофтороз) в условиях Республики Карелия со сравнительной оценкой их эффективности с бактериальными (Фитоспорин-М) и химическими препаратами (йодистый калий). Полученные данные показывают, что развитие фитофтороза (*P. infestans*) на листьях картофеля сорта Ред Скарлетт снижалось от их действия по сравнению с контрольным вариантом на 31-43%. Иммунологическая оценка клубней после уборки показала не только снижение распространения ризоктониоза и парши обыкновенной на 42 и 48% к контролю, но и их развития до 6,3 и 6,5% соответственно. Наиболее эффективным вариантом характеризовалась двукратная обработка водной суспензией живых культур симбиотических бактерий *X. bovienii*, при которой степень развития симптомов болезни на клубнях снижалась до 2,5% по сравнению с контролем (20,8%). Показана высокая биологическая эффективность (БЭ) симбиотических бактерий: их использование способствовало уменьшению развития парши обыкновенной в среднем на 18%, а ризоктониоза на 15%. Максимальная БЭ (от 75 до 88%) получена на парше обыкновенной при обработке картофеля живой культурой симбиотических бактерий и на уровне 47-55% от ризоктониоза при применении автоклавированной культуры симбиотических бактерий. Использование культур симбиотических бактерий, йодистого калия и Фитоспорина-М обеспечивали, помимо защитно-стимулирующего эффекта, прибавку урожая общей и товарной продукции по сравнению с контрольным вариантом от 8 до 39%. На основании полученных экспериментальных данных выявлен значительный потенциал возможностей использования биологически активных вторичных метаболитов *Xenorhabdus sp.* не только *in vitro*, но и в *in vivo* культурах в качестве средств защиты растений от возбудителей заболеваний на картофеле.

Ключевые слова: симбиотические бактерии *Xenorhabdus bovienii* энтомопатогенных нематод, картофель, парша, ризоктониоз

Original article

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING THE METABOLIC PRODUCTS OF SYMBIOTIC BACTERIA (*XENORHABDUS BOVIENII*) OF ENTOMOPATHOGENIC NEMATODES IN POTATO PROTECTION FROM PATHOGENS

Z.P. Kotova¹, L.G. Danilov², T.A. Danilova¹, Yu.A. Tyukalov¹¹North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance — separate structural subdivision of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia²All-Russian Institute of Plant Protection, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The results of laboratory and field studies conducted in 2021-2022 to study the inhibitory effect of symbiotic bacteria are presented. *Xenorhabdus bovienii* of entomopathogenic nematodes *Steinernematidae* on potato pathogens (scab, rhizoctoniosis, late blight) with a comparative assessment of their effectiveness with bacterial (Phytopsporin-M) and chemical (potassium iodide) preparations carried out in the Republic of Karelia are presented. The obtained data showed that the development of late blight (*P. infestans*) on the leaves of the potato variety Red Scarlett decreased from the preparations compared to the control variant by 31-43%. Immunological evaluation of the potato tubers after harvesting showed not only a decrease in the spread of rhizoctoniosis and scab by 42 and 48% compared to the control, but also a decrease of their development to 6.3 and 6.5%, respectively. The most effective treatment was two-fold treatment with an aqueous suspension of symbiotic bacteria *X. bovienii*, in which the degree of development of disease symptoms on tubers decreased to 2.5% compared to the control (20.8%). The high biological efficiency of symbiotic bacteria was shown, the treatments contributed to a decrease in the development of scab by 18%, and rhizoctoniosis by 15% on average. The maximum biological efficiency from 75 to 88% was obtained on scab when treating potatoes with a live culture of the symbiotic bacteria, and from 47 to 55% was obtained on rhizoctoniosis when using an autoclaved culture of the symbiotic bacteria. The use of cultures of symbiotic bacteria, potassium iodide and Phytopsporin-M provided a stimulating effect in addition to the protective one, an increase in the yield of total and marketable products was by 8-39% compared to the control variant. Based on the experimental data obtained, a significant potential of the use of biologically active secondary metabolites of *Xenorhabdus sp.* was revealed not only *in vitro*, but also *in vivo* cultures as plant protection agents against potato pathogens.

Keywords: symbiotic bacteria *Xenorhabdus bovienii* entomopathogenic nematodes, potatoes, scab, rhizoctoniosis

В современных условиях ведения сельскохозяйственного производства особую актуальность приобретают системы земледелия, базирующиеся на мероприятиях, при которых к числу важнейших методов снижения численности вредителей и болезней относятся биологические системы защиты сельскохозяйственных культур. Энтомопатогенные нематоды (ЭПН) рода *Steinernema* являются эффективными биологическими агентами для контроля численности

насекомых [1]. Механизм, с помощью которого эти нематоды способны заражать и размножаться в насекомом-хозяине, включает в себя взаимную связь между нематодами и симбиотическими бактериями *Xenorhabdus sp.* Симбиотическая ассоциация необходима для выживания как нематод, так и их симбиотических бактерий. Энтомопатогенные нематоды успешно используются в качестве коммерческих биопестицидов. Однако слабая выживаемость инвазионных личинок

нематод при ультрафиолетовом облучении и высушивании на открытой поверхности ограничивает их использование против многих целевых видов насекомых-вредителей [2-4]. Тем не менее продукция вторичных метаболитов с антибиотическими свойствами является общей характеристикой энтомопатогенных бактерий *Xenorhabdus sp.* Эти метаболиты имеют не только разнообразную химическую структуру, но и обладают антибиотической, противогрибковой, ин-



сектицидной, нематодной, противоязвенной, противоопухолевой и противовирусной биологической активностью, перспективность их применения рассматривается в медицине и сельскохозяйственном производстве [5-7]. В мировой практике в последние годы отмечают определенные успехи практического применения симбиотических бактерий в качестве биологических агентов против насекомых-вредителей и микроорганизмов [8-13].

Исследованиями установлено, что автоклавирование питательного бульона с развитой культурой симбиотических бактерий при 121°C в течение 10 минут не влияет на антибиотическую активность бесклеточных культур видов *Xenorhabdus*, и в то же время такие культуры сохраняют свою активность в течение длительного времени в отличие от живых бактериальных культур [14]. Известно также, что *Xenorhabdus bovienii* продуцирует два класса антибиотиков — индолы и дитиолопирролоны (ксенорабдины, ксеномины и ксенороксиды), которые могут ингибировать рост *Botrytis cinerea*, *Phytophthora capsici* и *P. ultimum* [15]. *X. bovienii*, по-видимому, уникален по разнообразию низкомолекулярных противомикробных соединений, поскольку только из штамма этого вида были выделены четыре индола, несколько ксенорабдинов, ксеноминов и ксенороксидов. Эти соединения показали сильную активность против грамположительных бактерий, дрожжей и многих видов грибов. На основании испытаний *in vitro* был сделан вывод, что антибиотики из *X. bovienii* могут предоставить хорошую возможность для борьбы с болезнями, вызываемыми некоторыми видами фитопатогенных грибов. В частности, бесклеточный фильтрат *X. bovienii* проявляет самые высокие ингибирующие эффекты (>98%) на рост мицелий *P. capsici* и *B. cinerea* и его можно использовать для борьбы с серой гнилью, вызываемой *B. cinerea* на растениях томатов, и ожогом листьев, вызываемым *P. capsici* на растениях перца. Метаболиты *X. bovienii* могут подавлять *P. infestans* на листьях картофеля лишь с небольшой фитотоксичностью [16].

На Европейском Севере, и в частности в Республике Карелия, картофель поражается многими видами грибных и бактериальных заболеваний. Из них наиболее распространены фитофтороз, макроспориоз, обыкновенная и другие виды парши, черная ножка, кольцевая гниль и другие грибные и бактериальные болезни. Гриб *P. infestans* развивается только при высокой влажности воздуха (не ниже 75%) или при наличии капельножидкой влаги. В период вегетации наряду с фитофторозом большой экономический ущерб причиняет черная ножка (ризоктониоз), серебристая и ооспорозная парша, а в период хранения фомоз и фузариоз. Их вредоносность не исчерпывается гибелью клубней при хранении. Установлено, что протравливание и последующие две обработки ботвы картофеля препаратами Фитоспорин-М и Гумми-80 эффективно подавляют развитие корневой гнили, парши обыкновенной и значительно снижают развитие ризоктониоза на клубнях картофеля [17].

Кроме биологических препаратов, применяемых на культуре картофеля, есть еще группа химических препаратов, позволяющих не менее эффективно стимулировать растения для борьбы с различными заболеваниями. В этой связи особого внимания заслуживает йод растений, в значительной мере связанный с органическими соединениями, прежде всего с белковыми, он намного эффективнее усваивается организмом, чем из неорганических препаратов [18-19].

Поэтому значительный практический интерес представляет сравнительная оценка эффективности против возбудителей заболеваний картофеля, наряду с бактериальными (Фитоспорин-М) и химическими препаратами (йодид калия), водных растворов живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий ЭПН.

Цель исследований — изучить возможности полифункционального применения энтомопатогенных нематод и их симбиотических бактерий в качестве безопасных средств защиты картофеля от возбудителей заболеваний в условиях Европейского Севера.

Объекты и методы исследований. Лабораторный опыт проводили на базе Всероссийского института защиты растений (ВИЗР), полевой опыт — в Республике Карелия на дерново-слабоподзолистой легкосуглинистой почве со следующими агрохимическими характеристиками: рН_{кд} — 5,11, содержание гумуса — 3,92%, подвижных фосфатов (по Кирсанову) — 252 мг/кг, обменного калия (по Масловой) — 168 мг/кг.

Чистые культуры первичных форм симбиотических бактерий получали по методу Г. Пойнара [20] путем заражения нематодами гусениц большой воштинной моли (*Galleria mellonella*), выращенных по методу Датки и др. [21], с последующим отбором бактериальных клеток из гемолимфы насекомых и посевом их на питательный агар Макконки, содержащий красители — бромтимоловый голубой (0,004%) и трифенилтетразолил хлорид (0,025%). Спустя трое суток после выращивания бактерий при 25°C и идентификации первичных форм симбиотических бактерий отбирали колонии по морфологическим признакам и характеру их окраски [22].

Схема полевого опыта включала 4 варианта: 1 — Фитоспорин-М (паста); 2 — йодид калия (КJ), концентрация 0,02%; 3 — культуральный бульон симбиотических бактерий (*X. bovienii*) ЭПН с исходным титром бактериальных клеток 1×10^7 (автоклавированная культура при температуре 120°C в течение 10 минут) — ЭПН-1; 4 — культуральный бульон с живыми клетками симбиотических бактерий ЭПН с титром бактериальных клеток 1×10^7 — ЭПН-2. Контрольный вариант включал обработку клубней водой.

Изучение эффективности средств биологической защиты картофеля от возбудителей заболеваний (парша, ризоктониоз, фитофтороз) проводилось на среднераннем сорте картофеля Ред Скарлет. Перед закладкой опыта все клубни были обработаны исследуемыми препаратами согласно вариантам опыта, а обработку вегетирующих растений проводили в фазах полных всходов, бутонизации и цветения. Норма расхода рабочего водного раствора бактериальных препаратов — 40 л/га (титр бактериальных клеток 1×10^7). Фитоспорин-М использовали согласно инструкции (клубни обрабатывали в концентрации 20% препарата, вегетирующих растений — 1% раствором).

Площадь опытной делянки — 3 м² (1,5x2 м), повторность в опыте 6-кратная, размещение вариантов рендомизированное. Посадку проводили в нарезанные борозды по схеме 70x30 см. Густота посадки составила 47,6 тыс. шт. клубней на 1 га. Применяемая в опытах агротехника — общепринятая для региона. Биометрические показатели картофеля определяли в фазах появления всходов и цветения растений. Основную уборку проводили одновременно после скашивания ботвы. Учет урожая проводили сплошным весовым методом. Структуру урожая рассчитывали по 5-ти растениям. Статистическая обработка проведена с применением программы

Excel и Statgraphic. Расчет развития болезней проводили по формуле:

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

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

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

$$БЭ = \frac{R_k - R_0}{R_k} \cdot 100\%,$$

где БЭ — биологическая эффективность, %; R_k — развитие болезни в контрольном варианте на дату учета, %; R_0 — развитие болезни в опытном варианте на дату учета, % [23].

Результаты исследований. Проведенные фенологические наблюдения и данные биометрических измерений свидетельствуют о том, что все изучаемые препараты не оказали отрицательного влияния на рост и развитие растений. Все фазы роста и развития картофеля, определяемые по количеству побегов и высоте ботвы, наступали одновременно (табл. 1). Тем не менее проведенные обработки изучаемых препаратов во время цветения существенно влияли на рост растений и побегообразование, обеспечив при этом от 1 до 13% превышение к контролю. Наибольшее количество побегов наблюдалось при однократной обработке растений картофеля водной суспензией автоклавированных и живых культур симбиотических бактерий, что выше контроля на 78-87% соответственно. Трехкратная обработка йодидом калия также существенно превышала показатели контрольного варианта — на 78%.

Применение изучаемых химических и биологических препаратов против различных болезней на картофеле оказывало достоверное их влияние как на распространение, так и на развитие фитофтороза, ризоктониоза и парши обыкновенной (табл. 2).

В целом все изучаемые препараты оказали влияние на развитие фитофтороза на листьях картофеля, осуществляя его снижение по сравнению с контрольным вариантом на 31-43%. При этом наибольшую защиту (65-63% соответственно) в течение всего срока вегетации обеспечила одно- и двукратная обработка растений автоклавированной культурой суспензией ЭПН с титром 10^7 (ЭПН-1).

Иммунологическая оценка по устойчивости картофеля к ризоктониозу и парше обыкновенной, проведенная после уборки клубней, показала снижение не только распространения, но и развития различных патогенов в зависимости от используемых препаратов. Если на контроле распространение на клубнях парши обыкновенной и ризоктониоза было на уровне 42 и 48%, то развитие этих же болезней при применении препаратов было значительно ниже и составляло среднее 6,3 и 6,5% соответственно. При этом все изучаемые препараты уменьшали число клубней, пораженных паршой обыкновенной, в 2,5-5,9 раза. Однако наиболее эффективным вариантом характеризовалась двукратная обработка водной суспензией живых культур симбиотических бактерий *X. bovienii*, при которой степень развития симптомов болезни на клубнях снижалась до 2,5% по сравнению с контролем (20,8%).



Таблица 1. Влияние препаратов на биометрические показатели растений картофеля в фазах полных всходов и цветения

Table 1. Influence of drugs on the biometric parameters of potato plants in the phases of full germination and flowering

Препарат	Обра-ботки	Фаза полных всходов		Фаза цветения		
		высота, см	высота, см	% от контроля	побеги, шт./раст.	% от контроля
Фитоспорин-М	1	18,2	52,7	109	3,7	161
	2	15,3	50,0	104	3,1	135
	3	16,2	47,3	98	3,3	143
КJ	1	18,5	51,7	107	3,3	143
	2	17,2	54,0	112	3,0	130
	3	20,0	52,9	110	4,1	178
ЭПН-1	1	18,4	54,7	113	3,9	171
	2	18,1	49,7	103	3,1	135
	3	15,4	54,0	112	3,3	143
ЭПН-2	1	18,7	49,3	102	4,3	187
	2	19,0	51,3	107	2,9	126
	3	18,5	48,7	101	2,2	96
Контроль		19,2	48,2	-	2,3	-
Стандартное отклонение		1,39	2,33		0,60	

В зависимости от применяемых препаратов распространение ризоктониоза снижалось на 7-26%, а степень его развития была в 1,7-2,1 раза ниже по сравнению с контрольным вариантом. Максимальное ингибирование возбудителя ризоктониозной корневой гнили гриба *R. solani* отмечено при обработке клубней и растений водной суспензией живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий. При этом снижение степени развития болезни с ЭПН-1 составило 6,4-5,8% против 12,1% в контроле.

Биологическая эффективность (БЭ) применения препаратов указывает на то, что их обработка в целом способствовала уменьшению развития парши обыкновенной в среднем на 18%, а ризоктониоза — на 15% (рис.). Максимальная биологическая эффективность изучаемых препаратов получена на парше обыкновенной при обработке картофеля йодистым калием (от 70 до 78%) и ЭПН-2 (от 75 до 88%). При использовании ЭПН-1 биологическая эффективность по парше была на уровне 53-70%. Максимальная защита растений от ризоктониоза была менее выражена и колебалась в среднем от действия изучаемых препаратов на уровне 50%.

В процессе оценки действия препаратов установлено, что их применение оказало положительное влияние не только на формирование и рост растений, снижение развития парши обыкновенной и ризоктониоза на клубнях, но и на продуктивность картофеля в целом (табл. 3).

В целом прибавка урожайности картофеля в зависимости от действия препаратов и кратности их обработок в среднем колебалась от 20,1% по Фитоспорину-М до 28,4 и 25,0% по КJ и ЭПН-2. Среди изучаемых препаратов наибольшая прибавка урожайности картофеля была получена при обработке клубней при посадке и применении 0,02% водного раствора йодистого калия (7,98 т/га) и живой культуры суспензии симбиотических бактерий энтомопатогенных нематод (7,02 т/га). Использование Фитоспорина-М и автоклавированной культуры симбиотических бактерий также обеспечивало прибавку урожая от 5,19 до 5,66 т/га или 18,5 и 20,1% к контролю.

Анализируя кратность обработок изучаемыми препаратами следует отметить, что при обработке вегетирующих растений картофеля в фазе полных всходов полученная самая высокая

Таблица 2. Действие препаратов на распространение и развитие различных болезней на картофеле

Table 2. The effect of drugs on the spread and development of various diseases on potatoes

Препарат	Обра-ботки	Парша обыкновенная, клубни		Ризоктониоз, клубни		Фитофтороз на листьях	
		P*, %	R**	P*, %	R**	P*, %	R**
Фитоспорин-М	1	27	6,7	27	7,5	93	13,1
	2	28	8,3	33	8,3	100	19,0
	3	58	9,2	7	5,8	100	15,0
КJ	1	25	6,3	32	6,7	100	11,7
	2	18	4,6	65	8,3	100	22,2
	3	20	5,0	23	5,8	100	10,6
ЭПН-1	1	30	8,3	36	6,3	100	12,4
	2	36	10,0	40	5,4	100	12,6
	3	25	6,3	47	5,4	100	18,0
ЭПН-2	1	20	5,0	25	6,3	100	14,4
	2	10	2,5	23	5,8	100	16,1
	3	12	2,9	27	6,7	93	13,9
Контроль		42	20,8	48	12,1	100	20,5

P* — распространение болезни;
R** — развитие болезни.

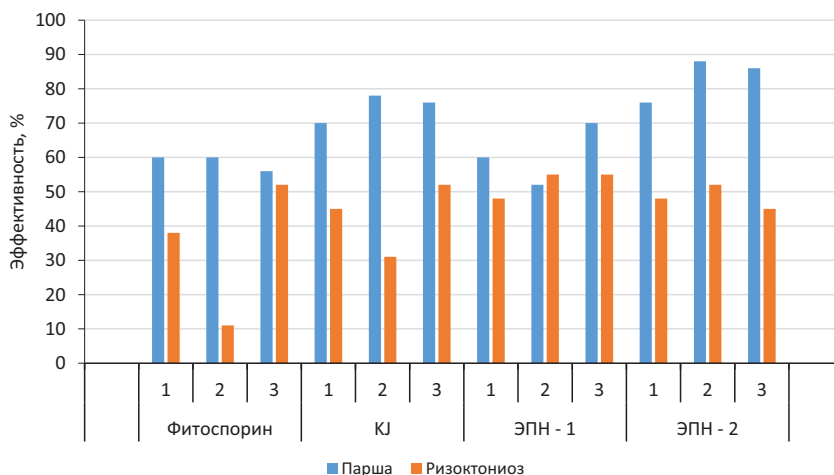


Рисунок. Биологическая эффективность препаратов на клубнях картофеля
Figure. Biological efficacy of preparations on potato tubers

Таблица 3. Продуктивность картофеля в зависимости от применения препарата и кратности обработок
Table 3. Potato productivity depending on the use of the preparation and the frequency of treatments

Препарат	Внекорневые обработки, т/га			Среднее, т/га	Прибавка урожайности	
	1	2	3		т/га	%
Фитоспорин-М	36,08	34,80	30,49	33,79	5,66	20,1
КJ	37,35	36,20	34,79	36,11	7,98	28,4
ЭПН-1	31,25	34,06	34,63	33,32	5,19	18,5
ЭПН-2	38,63	34,73	32,09	35,15	7,02	25,0
Среднее, т/га	35,83	34,95	33,00	-	-	-
Контроль	-	-	-	28,13	-	-
HCP ₀₅₅ , т/га				2,06		

урожайность от внесения 0,02% КJ (37,35 т/г) и живой культуры симбиотических бактерий (38,63 т/га). При опрыскивании растений в фазах бутонизации и цветения отмечается снижение урожайности картофеля по всем изучаемым препаратам. Возможно, это связано со стимулирующим эффектом изучаемых препаратов, вызванных с увеличением побегообразования и вегетирующей массы растений, и, как следствие, со снижением его продуктивности на фоне усиления физиологических ростовых процессов [10].

Анализ структуры урожая картофеля показал, что все исследуемые препараты досто-

верно увеличивали как общую, так и товарную урожайность по сравнению с контрольным вариантом, обеспечивая при этом повышение сбора товарной продукции на 2,44-10,67 т/га или 9-39% и общей, соответственно, на 2,37-10,5 т/га или 8-37% (табл. 4). Кроме того, установлено, что наибольшая урожайность отмечена при использовании обработки клубней и однократным опрыскиванием растений йодидом калия (КJ) и водной суспензией живых культур симбиотических бактерий. Товарность клубней в опыте при этом была на уровне 97-99%.



Таблица 4. Структура урожая картофеля в зависимости от применения препарата и кратности обработок
Table 4. The structure of the potato crop depending on the use of the drug and the frequency of treatments

Препарат	Обработки	Средний вес одного растения, г	Клубней с растения, шт.		Масса клубня, г		Товарность, %	Урожайность, т/га	
			всего	товарных	средняя	товарная		товарная	общая
Фитоспорин-М	1	721,6	7,8	6,2	92,5	115,0	99	35,66	36,08
	2	695,9	7,6	6,0	91,6	113,8	98	34,15	34,80
	3	609,8	8,2	7,1	74,4	84,0	98	29,82	30,49
КJ	1	747,0	9,1	8,2	82,1	89,6	98	36,75	37,35
	2	723,9	7,2	6,4	100,5	111,8	99	35,78	36,20
	3	695,7	9,0	6,9	77,3	97,7	97	33,70	34,78
ЭПН-1	1	624,9	7,5	6,2	83,3	98,6	98	30,56	31,24
	2	681,1	8,2	6,7	83,1	99,9	98	33,48	34,06
	3	692,5	8,0	6,6	86,6	103,1	98	34,02	34,62
ЭПН-2	1	772,6	7,9	6,7	97,8	113,6	98	38,05	38,63
	2	694,5	9,1	7,1	76,3	95,2	97	33,81	34,75
	3	641,7	6,7	5,6	95,8	111,3	97	31,15	32,08
Контроль		562,5	7,0	5,9	80,4	92,8	97	27,38	28,12
	НСР ₀₉₅							1,86	2,06

Выявлено также, что наибольший вес клубней с одного растения получен в вариантах с однократной обработкой растений Фитоспорином-М (721,6 г), йодидом калия (747,0 г) и ЭПН-2 (772,6 г) или на 28,3-37,4% больше по сравнению с контролем (562,5 г). Кроме того, обработка клубней Фитоспорином-М и ЭПН-2 с однократной обработкой вегетирующих растений способствовала увеличению массы товарных клубней до 115,6 и 113,6 г соответственно, что выше контроля на 22-24%.

Закключение. В ходе исследований по оценке эффективности полифункционального применения энтомопатогенных нематод и их симбиотических бактерий в качестве безопасных средств защиты картофеля от возбудителей заболеваний парши, ризоктониоза и фитофтороза в условиях Республики Карелия были получены результаты, позволившие выявить следующее закономерности. Все изучаемые препараты снижали развитие *P. infestans* по сравнению с контрольным вариантом на 31-43%. Наибольшую защиту растений в течение всего срока вегетации (на 65-63%) обеспечивала обработка клубней картофеля перед посадкой и одно- и двукратная обработка растений автоклавированной культурой симбиотических бактерий. Иммунологическая оценка по устойчивости картофеля к ризоктониозу и парше обыкновенной, проведенная после уборки клубней, показала высокую эффективность всех изучаемых препаратов в ограничении развития патогенов. При этом наиболее эффективным вариантом характеризовалась обработка клубней перед посадкой и двукратная обработка растений суспензией живых культур симбиотических бактерий *X. bovienii*, при которой степень развития симптомов болезни на клубнях снижалась до 2,5% по сравнению с контролем (20,8%). В зависимости от применяемых препаратов распространение ризоктониоза снижалось на 7-26%, а степень развития болезни была в 1,7-2,1 раза ниже по сравнению с контрольным вариантом. Максимальное ингибирование гриба *R. solani* отмечено при обработке клубней и растений суспензией живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий *X. bovienii*, обеспечивающих снижение степени развития болезни, соответственно, на 6,4 и 5,8% против 12,1% в контроле.

Биологическая эффективность (БЭ) применения препаратов показала, что их использование способствовало уменьшению развития

парши обыкновенной в среднем на 18%, а ризоктониоза на 15%. Максимальная биологическая эффективность изучаемых препаратов получена на парше обыкновенной при обработке клубней картофеля и вегетирующих растений йодистым калием (от 70 до 78%) и живой культурой симбиотических бактерий (от 75 до 88%). При использовании автоклавированной культуры симбиотических бактерий биологическая эффективность по парше была на уровне 53-70%. Максимальная защита растений от ризоктониоза была менее выражена и колебалась в среднем от действия изучаемых препаратов на уровне 50%.

В целом прибавка урожайности картофеля в зависимости от действия препаратов и кратности их обработок в среднем колебалась от 20,1% по Фитоспорино-М до 28,4 и 25,0% по КJ и культуре симбиотических бактерий. Среди изучаемых препаратов наибольшая прибавка урожайности картофеля была получена при применении 0,02% водного раствора йодистого калия (7,98 т/га) и живой культуры энтомопатогенных нематод с титром 10^7 (7,02 т/га). Использование Фитоспорино-М и автоклавированной культуры симбиотических бактерий также обеспечивали прибавку урожая от 5,19 до 5,66 т/га или 18,5 и 20,1% к контролю. При этом наибольший урожай клубней получен в вариантах с обработкой клубней и однократным опрыскиванием растений йодидом калия и суспензией живых культур симбиотических бактерий — 37,35 и 38,63 т/га соответственно.

Анализ структуры урожая картофеля показал, что все исследуемые препараты достоверно увеличивали как общую, так и товарную урожайность по сравнению с контрольным вариантом, обеспечивая при этом повышение сбора общей и товарной продукции от 8 до 39%. При уровне товарности клубней в 97-99% наибольшая урожайность картофеля получена при обработке клубней перед посадкой и однократном опрыскивании растений в фазе полных всходов йодидом калия (КJ) и водной суспензией живых культур симбиотических бактерий. Установлено также, что обработка клубней перед посадкой и опрыскивание растений в фазе полных всходов Фитоспорином-М, 0,02% раствором КJ и водной суспензией живых культур симбиотических бактерий способствовали увеличению массы товарных клубней на 22-24% по сравнению с контролем.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных и результатов зарубежных исследователей [10, 24-25] выявлен значительный потенциал использования биологически активных вторичных метаболитов *Xenorhabdus sp.* не только *in vitro*, но и в *in vivo* культурах в качестве средств защиты растений в сельскохозяйственной практике.

Вывод. В полевых условиях определены возможности эффективного использования продуктов метаболизма живых и автоклавированных культур симбиотических бактерий *Xenorhabdus sp.* энтомопатогенных нематод (*Steinernematidae*) в защите картофеля от возбудителей заболеваний и создания на их основе новых биологических препаратов.

Список источников

- Kaya, H.K., Gaugler, R. (1993). Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, no. 38, pp. 181-206.
- Akhurst, R.J., Dunphy, G.B. (1993). Tripartite interactions between symbiotically associated entomopathogenic bacteria, nematodes, and their insect hosts. In: *Parasites and Pathogens of Insects*, vol. 2, Pathogens. Academic Press, pp. 1-23.
- Navon, A.S. Keren, L., Salame, Glazer, I. (1998). An Edible-to-insects Calcium Alginate gel as a Carrier for Entomopathogenic Nematodes. *Biocontrol Science Technology*, no. 8 (3), pp. 429-437. doi: 10.1080/09583159830225
- Poinar, G.O. (1979). *Nematodes for Biological Control of Insects*. Boca Raton, Florida, CRC Press, 289 p. doi: 10.1201/9781351074957
- Webster, J.M., Chen, G., Hu, K., Li, J. (2002). *Bacterial metabolites*. In: Gaugler, R. (Ed.), *Entomopathogenic Nematology*. CAB International, Wallingford, pp. 99-113.
- Brachmann, A.O., Bode, H.B. (2013). Identification and bioanalysis of natural products from insect symbionts and pathogens. *Part of the Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology book series (ABE)*, vol. 135, pp. 123-155. doi: 10.1007/10_2013_192
- Engel, Y., Windhorst, C., Lu, X., Goodrich-Blair, H., Bode, H.B. (2017). The global regulators Lrp, LeuO, and HexA control secondary metabolism in entomopathogenic bacteria. *Frontiers in Microbiology*, no. 8. doi: 10.3389/fmicb.2017.00209
- Cho, S., Kim, Y. (2004). Hemocyte apoptosis induced by entomopathogenic bacteria, *Xenorhabdus* and *Photorhabdus*, in *Bombyx mori*. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, no. 7, pp. 195-200. doi: 10.1016/S1226-8615(08)60215-0
- Mahar, A.N., Munir, M., Elawad, S., Gowen, S.R., Hague, N.G. (2004). Microbial control of diamondback moth, *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Yponomeutidae) using bacteria (*Xenorhabdus nematophila*) and its metabolites from the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae*. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, no. 5, pp. 1183-1190.
- Fang, X.L., Li, Z.Z., Wang, Y.H., Zhang, X. (2011). *In vitro* and *in vivo* antimicrobial activity of *Xenorhabdus bovienii* YL002 against *Phytophthora capsici* and *Botrytis cinerea*. *Journal of Applied Microbiology*, no. 111, pp. 145-154. doi: 10.1111/j.1365-2672.2011.05033.x
- Данилов Л.Г., Варфоломеева Е.А., Эффективность бактерий-симбионтов энтомопатогенных нематод против клещей и насекомых-вредителей растений в условиях защищенного грунта // Защита и карантин растений. 2018. № 12. С. 41.
- Danilov, L.G., Kaplin, V.G. Nematicidal activity of nematode — symbiotic bacteria *Xenorhabdus bovienii* and *X. nematophila* against root-knot nematode *Meloidogyne incognita* // Паразитология. 2020. Т. 54. № 5. С. 413-422. doi: 10.31857/S1234567806050041
- Danilov, L.G., Ivanova, G.P., Kaplin, V.G., Varfolomeeva, E.A. Acaricidal activity of entomopathogenic nematode-symbiotic bacteria *Xenorhabdus bovienii* and *X. nematophila* against mite *Tetranychus urticae* // Паразитология. 2023. Т. 57. № 1. С. 64-76. doi: 10.31857/S0031184723010064
- Fodor, A., Fodor, A.M., Forst, S., Hogan, J.S., Klein, M.G., Lengyel, K., Sáring, G., Stackebrandt, E., Taylor, R., A. J. and Lehoczy, É. (2010). Comparative analysis of antibacterial activities of *Xenorhabdus* species on related and non-related bacteria *in vivo*. *Journal of Microbiology and Antimicrobials*, vol. 2 (4), pp. 36-46.
- Wang, Y., Fang, X., An, F., Wang, G., Zhang, X. (2011). Improvement of antibiotic activity of *Xenorhabdus bovienii*



by medium optimization using response surface methodology. *Microbial Cell Factories*, vol. 10, no. 98. doi: 10.1186/1475-2859-10-98

16. 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

17. Лысенко Ю.Н., Барашкин И.И., Плужникова В.А. Экологизированная система защиты картофеля от болезней // Селекция и семеноводство сельскохозяйственных культур: 8-я Всероссийская научно-практическая конференция. Пенза, 2004. С. 70-74.

18. Кашин В.К. Йод в объектах окружающей среды Забайкалья и эффективность обогащения им растений // Химия в интересах устойчивого развития. 2008. Т. 16. № 2. С. 173-182.

19. Данилова Т.А., Филиппова П.С., Котова З.П. Влияние йодистого калия на урожайность и качественные показатели свеклы столовой и картофеля // Агрохимический вестник. 2022. № 5. С. 16-20. doi: 10.24412/1029-2551-2022-5-004

20. Poinar, G. (1966). The presence of *Achromobacter nematophilus* in the infective stage of a *Neoplectana* sp. *Nematologica*, vol. 12, no. 1, pp. 31-35. doi: 10.1163/187529266X00068

21. Dutky, S.R., Thompson, J.V., Cantwell, G. (1964). A technique for the mass propagation of the DD-136 nematode. *Journal of Insect Physiology*, vol. 6, no. 4, pp. 417-422.

22. Akhurst, R.J. (1980). Morphological and Functional Dimorphism in *Xenorhabdus* spp., Bacteria Symbiotically Associated with the Insect Pathogenic Nematodes *Neoplectana* and *Heterorhabditis* Free. *Journal of General Microbiology*, vol. 121, no. 2, pp. 303-309. doi: 10.1099/00221287-121-2-303

23. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / МСХ РФ, 2009. С. 124-139.

24. Böszörményi, E., Érsek, T., Fodor, A.M., Fodor, A.M., Földes, L.Sz., Hevesi, M., Hogan, J.S., Katona, Z., Klein, M.G., Kormány, A., Pekár, S., Szentirmai, A., Sztaricskai, F., Taylor, R.A. (2009). Isolation and activity of *Xenorhabdus* antimicrobial compounds against the plant pathogens *Erwinia amylovora* and *Phytophthora nicotianae*. *Journal of Applied Microbiology*, vol. 107, no. 3, pp. 746-759. doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04249.x

25. Shapiro-Ilan, D.I., Reilly, C.C., Hotchkiss, M.W. (2009). Suppressive effects of metabolites from *Photorhabdus* and *Xenorhabdus* spp. on phytopathogens of peach and pecan. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, no. 42, pp. 715-728.

References

1. Kaya, H.K., Gaugler, R. (1993). Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, no. 38, pp. 181-206.

2. Akhurst, R.J., Dunphy, G.B. (1993). Tripartite interactions between symbiotically associated entomopathogenic bacteria, nematodes, and their insect hosts. In: *Parasites and Pathogens of Insects*, vol. 2, *Pathogens*. Academic Press, pp. 1-23.

3. Navon, A.S., Keren, L., Salame, Glazer, I. (1998). An edible-to-insects Calcium Alginate gel as a Carrier for Entomopathogenic Nematodes. *Biocontrol Science Technology*, no. 8 (3), pp. 429-437. doi: 10.1080/09583159830225

4. Poinar, G.O. (1979). *Nematodes for Biological Control of Insects*. Boca Raton, Florida, CRC Press, 289 p. doi: 10.1201/9781351074957

5. Webster, J.M., Chen, G., Hu, K., Li, J. (2002). *Bacterial metabolites*. In: Gaugler, R. (Ed.), *Entomopathogenic Nematology*. CABI Publishing, Wallingford, pp. 99-113.

6. Brachmann, A.O., Bode, H.B. (2013). Identification and bioanalysis of natural products from insect symbionts and pathogens. *Part of the Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology book series (ABE)*, vol. 135, pp. 123-155. doi: 10.1007/10_2013_192

7. Engel, Y., Windhorst, C., Lu, X., Goodrich-Blair, H., Bode, H.B. (2017). The global regulators Lrp, LeuO, and HexA control secondary metabolism in entomopathogenic bacteria. *Froniers in Microbiology*, no. 8. doi: 10.3389/fmicb.2017.00209

8. Cho, S., Kim, Y. (2004). Hemocyte apoptosis induced by entomopathogenic bacteria, *Xenorhabdus* and *Photorhabdus*, in *Bombyx mori*. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, no. 7, pp. 195-200. doi: 10.1016/S1226-8615(08)60215-0

9. Mahar, A.N., Munir, M., Elawad, S., Gowen, S.R., Hague, N.G. (2004). Microbial control of diamondback moth, *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Yponomeutidae) using bacteria (*Xenorhabdus nematophila*) and its metabolites from the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae*. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, no. 5, pp. 1183-1190.

10. Fang, X.L., Li, Z.Z., Wang, Y.H., Zhang, X. (2011). In vitro and in vivo antimicrobial activity of *Xenorhabdus bovienii* YL002 against *Phytophthora capsici* and *Botrytis cinerea*. *Journal of Applied Microbiology*, no. 111, pp. 145-154. doi: 10.1111/j.1365-2672.2011.05033.x

11. Danilov, L.G., Varfolomeeva, E.A., (2018). Effektivnost' bakterii-simbiontov ehntomopatogennykh nematod protiv kleshchei i nasekomykh-vrediteli rastenii v usloviyakh zashchishchennogo grunta [Bacterial symbionts of the entomopathogenic nematodes against the plant pests]. *Zashchita i karantini rastenii* [Plant protection and quarantine], no. 12, p. 41.

12. Danilov, L.G., Kaplin, V.G. (2020). Nematicidal activity of nematode — symbiotic bacteria *Xenorhabdus bovienii* and *X. nematophila* against root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *Parazitologiya*, vol. 54, no. 5, pp. 413-422. doi: 10.31857/S1234567806050041

13. Danilov, L.G., Ivanova, G.P., Varfolomeeva, E.A. (2023). Acaricidal activity of entomopathogenic nematode-symbiotic bacteria *Xenorhabdus bovienii* and *X. nematophila* against spider mite *Tetranychus urticae*. *Parazitologiya*, vol. 57, no. 1, pp. 64-76. doi: 10.31857/S0031184723010064

14. Fodor, A., Fodor, A.M., Forst, S., Hogan, J.S., Klein, M.G., Lengyel, K., Sáring, G., Stackebrandt, E., Taylor, R. A. J. and Lehoczy, E. (2010). Comparative analysis of antibacterial activities of *Xenorhabdus* species on related and non-related bacteria in vivo. *Journal of Microbiology and Antimicrobials*, vol. 2 (4), pp. 36-46.

15. Wang, Y., Fang, X., An, F., Wang, G., Zhang, X. (2011). Improvement of antibiotic activity of *Xenorhabdus bovienii*

by medium optimization using response surface methodology. *Microbial Cell Factories*, vol. 10, no. 98. doi: 10.1186/1475-2859-10-98

16. Domraчева, Л.И., Скугорева, С.Г., Стариков, П.А., Горностаева, Е.А., Ашихмина, Т.Я. (2022). Микробы-антагонисты против фитопатогенных бактерий и грибов (обзор) [Microbes-antagonists against of phytopathogenic bacteria and fungi (review)]. *Теоретическая и прикладная экология* [Theoretical and applied ecology], no. 2, pp. 6-14. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-006-014

17. Лысенко, Ю.Н., Барашкин, И.И., Плужникова, В.А. (2004). Экологизированная система защиты картофеля от болезней [Ecologized potato protection system against diseases]. *Селекция и семеноводство сельскохозяйственных культур: 8-я Всероссийская научно-практическая конференция*. Пенза, pp. 70-74.

18. Kashin, V.K. (2008). Iodine in the environment objects of agricultural crops: 8th All-Russian Scientific and Practical Conference. *Penza*, pp. 70-74.

19. Danilova, T.A., Filippova, P.S., Kotova, Z.P. (2022). Vliyaniye iodistogo kaliya na urozhainost' i kachestvennyye pokazateli svekly stolovoi i kartofelya [The effect of potassium iodide on the yield and quality of table beets and potatoes]. *Agrokhimicheskii vestnik* [Agrochemical herald], no. 5, pp. 16-20. doi: 10.24412/1029-2551-2022-5-004

20. Poinar, G. (1966). The presence of *Achromobacter nematophilus* in the infective stage of a *Neoplectana* sp. *Nematologica*, vol. 12, no. 1, pp. 31-35. doi: 10.1163/187529266X00068

21. Dutky, S.R., Thompson, J.V., Cantwell, G. (1964). A technique for the mass propagation of the DD-136 nematode. *Journal of Insect Physiology*, vol. 6, no. 4, pp. 417-422.

22. Akhurst, R.J. (1980). Morphological and Functional Dimorphism in *Xenorhabdus* spp., Bacteria Symbiotically Associated with the Insect Pathogenic Nematodes *Neoplectana* and *Heterorhabditis* Free. *Journal of General Microbiology*, vol. 121, no. 2, pp. 303-309. doi: 10.1099/00221287-121-2-303

23. Ministry of Agriculture of the Russian Federation (2009). *Metodicheskie ukazaniya po registratsionnym ispytaniyam fungitsidov v sel'skom khozyaistve* [Guidelines for registration testing of fungicides in agriculture]. Moscow, pp. 124-139.

24. Böszörményi, E., Érsek, T., Fodor, A.M., Fodor, A.M., Földes, L.Sz., Hevesi, M., Hogan, J.S., Katona, Z., Klein, M.G., Kormány, A., Pekár, S., Szentirmai, A., Sztaricskai, F., Taylor, R.A. (2009). Isolation and activity of *Xenorhabdus* antimicrobial compounds against the plant pathogens *Erwinia amylovora* and *Phytophthora nicotianae*. *Journal of Applied Microbiology*, vol. 107, no. 3, pp. 746-759. doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04249.x

25. Shapiro-Ilan, D.I., Reilly, C.C., Hotchkiss, M.W. (2009). Suppressive effects of metabolites from *Photorhabdus* and *Xenorhabdus* spp. on phytopathogens of peach and pecan. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, no. 42, pp. 715-728.

Информация об авторах:

Котова Зинаида Петровна, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Отдела земледелия и растениеводства, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, Scopus ID: 56129162700, zinaida_kotova@mail.ru

Данилов Леонид Григорьевич, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологической защиты растений, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3623-1081>, Scopus ID: 7006823965, biodanlg@mail.ru

Данилова Татьяна Алексеевна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Отдела земледелия и растениеводства, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1919-0695>, Scopus ID: 57221477511, danilovata2@bk.ru

Тюкалов Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Отдела земледелия и растениеводства, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2987-0806>, Scopus ID: 57208301881, yuat@mail.ru

Information about the authors:

Zinaida P. Kotova, doctor of agricultural sciences, leading researcher of the Department of agriculture and crop production, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9770-0809>, Scopus ID: 56129162700, zinaida_kotova@mail.ru

Leonid G. Danilov, doctor of agricultural sciences, leading researcher of the laboratory of microbiological plant protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3623-1081>, Scopus ID: 7006823965, biodanlg@mail.ru

Tatyana A. Danilova, candidate of agricultural sciences, leading researcher of the Department of agriculture and crop production, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1919-0695>, Scopus ID: 57221477511, danilovata2@bk.ru

Yury A. Tyukalov, candidate of technical sciences, leading researcher of the Department of agriculture and crop production, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2987-0806>, Scopus ID: 57208301881, yuat@mail.ru

