

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КАРТОФЕЛЯ (*Solanum tuberosum* L.) ОТ ГРИБНЫХ БОЛЕЗНЕЙ

В.Н. ЗЕЙРУК<sup>1</sup>✉, О.А. БОГОСЛОВСКАЯ<sup>2</sup>, С.В. ВАСИЛЬЕВА<sup>1</sup>,  
Г.Л. БЕЛОВ<sup>1</sup>, М.К. ДЕРЕВЯГИНА<sup>1</sup>, И.П. ОЛЬХОВСКАЯ<sup>2</sup>, Н.Н. ГЛУЩЕНКО<sup>2</sup>

Ежегодные потери урожая от болезней картофеля составляют до 30 %. В частности, ризоктониоз может привести к снижению продуктивности культуры на 20-25 %, альтернариоз — до 40 %. Получение высоких урожаев возможно только при применении средств защиты картофеля. Одним из них может быть использование наночастиц (НЧ) микроэлементов. В настоящей работе впервые созданы нанобиопрепараты, представляющие различные композиции НЧ Fe, Zn, Cu, Mo, Mg, Mn и B в составе полимеров для предпосадочной обработки клубней картофеля. Установлено, что НЧ микроэлементов эффективно защищают растения картофеля в течение всего вегетационного периода, и это позволяет снизить распространенность и степень развития фитопатогенов. Нашей целью было сравнение влияния предпосадочной обработки клубней препаратами, содержащими различные композиции наночастиц металлов в составе полимеров, на пораженность картофеля альтернариозом и ризоктониозом. НЧ металлов были получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 (ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Россия). Исползованные нами НЧ Fe, Zn, Cu, Mo, Mg, Mn и B представляли собой монокристаллические структуры сферической формы с оксидной пленкой на поверхности, которая формировалась в результате пассивации частиц воздухом для снижения пирофорности НЧ. При приготвлении препаратов навеску НЧ металлов диспергировали в воде на ультразвуковом дезинтеграторе Scientz JY 92-ПН («Scientz Biotechnology», Китай). Полученные суспензии вносили в раствор смеси полимеров 0,5 % натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы, 1 % полиэтиленгликоля-400 и натриевой соли диэтилдiamинотетрауксусной кислоты (0,0000375 %). Добавляли фунгицид Максим («Syngenta AG», Швейцария). Полученный раствор озвучивали и проводили предпосадочную обработку клубней картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Сантэ. Всего были созданы пять нанобиопрепаратов (НБП), содержащих одинаковое количество полимеров, в которые вводили НЧ микроэлементов: НБП 1 — НЧ Zn ( $10^{-8}$  %) + НЧ Cu ( $10^{-8}$  %) + НЧ Fe ( $10^{-6}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-8}$  %); НБП 2 — НЧ Zn ( $10^{-4}$  %) + НЧ Cu ( $10^{-8}$  %) + НЧ Fe ( $10^{-8}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-8}$  %); НБП 3 — НЧ Cu ( $10^{-9}$  %) + НЧ B ( $10^{-6}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-7}$  %) + НЧ Mg ( $10^{-6}$  %); НБП 4 — НЧ Cu ( $10^{-9}$  %); НБП 5 — НЧ Mn ( $10^{-6}$  %). Экспериментальное поле (ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха) находилось в типичных условиях для Центрального региона России (Люберецкий р-н Московской обл.). Почва опытного поля — дерново-подзолистая супесчаная. Посадку картофеля осуществляли в I декаде мая в 2018, 2019, 2020 и 2021 годах. Посадочные клубни опрыскивали с помощью раннего распылителя («Kwazar Corporation Sp. z o.o.», Польша) с нормой расхода рабочей жидкости из расчета 10 л/т. Учитывали распространенность альтернариоза (возбудитель *Alternaria solani* Sorauer) и ризоктониоза (возбудитель *Rhizoctonia solani* J.G. Kühn) картофеля, а также степень развития альтернариоза. Применение НБП 1 в 2018 и 2019 годах уменьшило распространенность альтернариоза по сравнению с контролем соответственно на 54,0 и 56,5 %, а степень поражения — на 58,4 и 62,0 %. НБП 2 в 2019 году снизил распространенность альтернариоза на 47,5 %, степень поражения — на 44,0 %. Установлено, что применение НБП 3, НБП 4 и НБП 5 в 2021 году привело к уменьшению распространенности альтернариоза у картофеля в среднем на 25 %, степени поражения — на 42 % по сравнению с контролем. При изучении распространенности ризоктониоза показано, что НБП 1 в 2018 году способствовал снижению этого показателя на 15,0 %, в 2019 году — почти в 3 раза (как и НБП 2). Применение НБП 5 (2021 год) уменьшало поражение этой болезнью на 22,0 % по сравнению с контролем, НБП 3 — на 50,0 %, НБП 4 — на 72,0 %. Наиболее перспективным нанобиопрепаратом для уменьшения степени поражения альтернариозом картофеля и подавления распространения альтернариоза и ризоктониоза представляется комбинированный нанобиопрепарат НБП 1, содержащий в составе НЧ Zn, Cu, Fe и Mo, введенные в гидрофильную полимерную пленку. Установлено, что в клубнях нового урожая не происходило накопления элементов, используемых в виде НЧ в НБП, что свидетельствует об экологической безопасности препаратов НЧ.

Ключевые слова: картофель, *Alternaria solani*, альтернариоз, *Rhizoctonia solani*, ризоктониоз, распространенность, степень развития, наночастицы металлов, наночастицы бора.

Одной из приоритетных задач сельского хозяйства остается увеличение урожайности в растениеводстве. Именно с помощью современных

технологий возможно повысить урожайность такой социально значимой культуры, как картофель. В России ежегодно производится 33 млн т картофеля — 11 % от суммарного годового урожая картофеля в мире. Средняя урожайность этой культуры в РФ достигает 12 т/га, хотя потенциал большинства сортов в 4-5 раз выше. Одной из причин низкой урожайности становится широкое распространение болезней картофеля, ежегодные потери урожая от которых составляют до 30 % (1).

Грибы — основные возбудители инфекционных болезней картофеля. Потребляя органические вещества, синтезируемые растениями, грибы вызывают истощение растений-хозяев, что приводит к снижению их урожайности и даже гибели. Так, грибы рода *Alternaria* вызывают развитие альтернариоза картофеля, потери урожая от которого могут составлять до 40 % (2). Возбудитель ризиктониоза — *Hypochnus solani* Prill. et Delacr. (несовершенная стадия гриба — *Rhizoctonia solani* J.G. Kuhn) распространен повсеместно и может привести к снижению продуктивности культуры на 20-25 %. Поражение ризиктониозом особенно усиливается в холодную и дождливую погоду (1).

Получение высоких урожаев возможно только при применении средств защиты картофеля: фунгицидов, бактерицидов, гербицидов, ратицидов, инсектицидов, дефолиантов, десикантов, регуляторов роста. Это создает зависимость картофелеводства от использования токсичных химических веществ и пестицидов, против применения которых все чаще выступают ученые разных стран. Поэтому в мире ведется поиск альтернативных или взаимодополняющих методов защиты картофеля от поражения возбудителями болезней (3-5). Один из них — использование нанотехнологий, которые широко применяются в различных областях науки и техники, в том числе в сельском хозяйстве, где позволяют осуществлять защиту растений от различных заболеваний (6-8).

Интерес к использованию наночастиц (НЧ) микроэлементов в растениеводстве и практике сельского хозяйства связан с их уникальными свойствами. НЧ имеют низкую токсичность (в 7-50 раз меньшую, чем у металлов в ионной форме), обладают пролонгированным и полифункциональным действием, стимулируют обменные процессы, легко проникают во все органы и ткани. Биологическая активность НЧ связана с особенностями их строения и физико-химическими характеристиками. НЧ металлов проявляют синергидный эффект с природными полисахаридами (9-11).

Учитывая эти уникальные свойства НЧ, в ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (г. Москва) разработан препарат на основе НЧ железа, цинка, меди и молибдена в составе полимерного покрытия, сформированного из смеси Na-карбоксиметилцеллюлозы и полиэтиленгликоля-400, установлены оптимальные концентрации и соотношения НЧ металлов. Полевые испытания показали, что предпосадочная обработка клубней картофеля препаратом, содержащим НЧ металлов в составе полимеров, способствует снижению распространенности и степени развития альтернариоза (12).

Для изучения влияния НЧ на рост и развитие растений картофеля и его продуктивность мы выбрали эссенциальные элементы: медь, бор, молибден, железо, цинк, марганец и магний, играющие исключительную роль в формировании урожая.

Известно, что медь ускоряет образование клубней картофеля и повышает устойчивость к фитопатогенам. При дефиците меди растения теряют тургор и верхние листья, снижается число продуктивных стеблей и замедляется рост (13). Бор обеспечивает боковой рост корней, улучшает

синтез крахмала и усвоение кальция, повышает качество и товарность урожая (14). Дефицит молибдена проявляется в плохом усвоении азота и, как следствие, в снижении скорости роста растений. Клубни, выращенные при дефиците молибдена, характеризуются низкими вкусовыми качествами, имеют горьковатый вкус (14).

Железо вовлечено в синтезе хлорофилла, влияет на активность ферментов и участвует в переносе электронов, что необходимо для фотосинтеза и производства энергии. Железо также способствует образованию основных белков и ферментов, поддерживающих рост и развитие растения. При недостатке железа наблюдаются признаки межжилкового хлороза, а в случае острой нехватки этого элемента наступает хлороз всей поверхности листа (15).

Цинк входит в состав ряда ферментов, которые участвуют в фотосинтезе, задействован в дыхательных процессах и окислительно-восстановительных реакциях. При недостатке цинка меняется строение листовой пластины, нарушается строение растительных тканей, отмечается снижение размеров хлоропластов и концентрации митохондрий. У картофеля наблюдается развитие хлороза. (16). Магний играет основную роль в процессах фотосинтеза, на ключевых этапах синтеза сахара и белка, при транспорте сахарозы от листьев к клубням. Характерным признаком недостатка магния становится межжилковый хлороз, который при значительном дефиците приводит к закручиванию и хрупкости листовых пластинок (17, 18).

Известно, что биологическая активность НЧ металлов связана с их физико-химическими характеристиками. Такие показатели, как размер частиц, их форма, фазовое состояние, влияют на биологическую активность НЧ (10, 11). Синтез НЧ с заданными физико-химическими параметрами позволяет учитывать дозозависимый эффект (12) и проводить направленное воздействие на показатели роста и развитие растений. Мы вводили НЧ в гидрофильную полимерную пленку, которая защищает клубни картофеля от инфекций и вредителей, предохраняет их от увядания при засухе, а также предотвращает диффузию НЧ в почву. Применение таких технологий позволило нам создать новые нанобиопрепараты для предпосадочной обработки картофеля.

В настоящей работе впервые созданы нанобиопрепараты, представляющие различные композиции НЧ Fe, Zn, Cu, Mo, Mg, Mn и B в составе полимеров для предпосадочной обработки клубней картофеля. Установлено, что НЧ микроэлементов эффективно защищают растения картофеля в течение всего вегетационного периода, и это позволяет снизить распространенность и степень развития фитопатогенов.

Нашей целью было сравнение влияния предпосадочной обработки клубней препаратами, содержащими различные композиции наночастиц металлов в составе полимеров, на пораженность картофеля альтернариозом и ризоктониозом.

*Методика.* НЧ металлов были получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 (ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Россия) (19).

Форму и размер НЧ оценивали методом электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе JSM 7401F («JEOL Ltd.», Япония) при напряжении 1 кВ. Для определения среднего диаметра НЧ микрофотографии обрабатывали с помощью компьютерной программы Micran 25 (<http://www.micran.ru/>), измеряя поперечный размер как минимум 1 тыс. частиц.

Используемые нами НЧ Fe, Zn, Cu, Mo, Mg, Mn и В представляли собой монокристаллические структуры сферической формы с оксидной пленкой на поверхности, которая формировалась в результате пассивации частиц воздухом для снижения пирофорности НЧ. Кривые распределения по размеру лежали для НЧ Fe в области 5-160 нм, для НЧ Zn — 5-250 нм, для НЧ Cu — 5-250 нм, для НЧ Mo — 5-150 нм, для НЧ В — 10-600 нм, для НЧ Mg — 5-600 нм. Средний диаметр НЧ Fe составлял  $56,0 \pm 0,9$  нм, НЧ Zn —  $60,6 \pm 3,7$  нм, НЧ Cu —  $65,0 \pm 1,2$  нм, НЧ Mo —  $70,0 \pm 2,1$  нм, НЧ В —  $134,0 \pm 5,4$  нм, НЧ Mg —  $193,0 \pm 12,0$  нм.

Рентгенофазный анализ (РФА) НЧ металлов проводили на рентгеновском анализаторе АДП-1 (НПО «Современные технологии неразрушающего контроля», Россия). В качестве источника излучения использовали кобальтовую трубку. Съемку осуществляли в следующем режиме: шаг  $0,05^\circ$ , время накопления сигнала 8-10 мин. Для установления фазового состава НЧ полученные интерференционные пики обрабатывали с помощью компьютерной программы Match 3.8.0.137 (<http://www.crystalimpact.com/>).

Синтезированные нанопорошки металлов вводили в состав нанобиопрепаратов для предпосадочной обработки клубней картофеля. При приготовлении препаратов навеску НЧ металлов диспергировали в воде на ультразвуковом дезинтеграторе Scientz JY 92-ПН («Scientz Biotechnology», Китай) в режиме 0,5 А, 44 кГц; время 30 с, перерыв 30 с (повторяли 3 раза) при охлаждении диспергируемой смеси льдом. Полученные суспензии добавляли в раствор смеси полимеров 0,5 % натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ), 1 % полиэтиленгликоля-400 (ПЭГ-400) и натриевой соли диэтилдiamинотетрауксусной кислоты (Na<sub>2</sub>-EDTA) (0,00000375 %). Прибавляли фунгицид Максим («Syngenta AG», Швейцария), содержащий в 1 л 25 г флудиоксонила, 10 г металаксил-М (0,4 л/т) и гумат калия универсальный (20 мл/л), который имел в своем составе от 30 до 60 % калиевых солей гуминовых кислот, минимальное количество фульвокислот и микроэлементы железа, медь, марганец, магний, молибден, цинк, серу. Приготовленный раствор озвучивали на ультразвуковом дезинтеграторе Scientz JY 92-ПН.

Всего были созданы пять нанобиопрепаратов (НБП), содержащих одинаковое количество полимеров, в которые вводили НЧ микроэлементов в разных концентрациях и соотношениях: НБП 1 — НЧ Zn (0,01 %) + НЧ Cu ( $10^{-8}$  %) + НЧ Fe ( $10^{-6}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-8}$  %); НБП 2 — НЧ Zn ( $10^{-4}$  %) + НЧ Cu ( $10^{-8}$  %) + НЧ Fe ( $10^{-8}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-8}$  %); НБП 3 — НЧ Cu ( $10^{-9}$  %) + НЧ В ( $10^{-6}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-7}$  %) + НЧ Mg ( $10^{-6}$  %); НБП 4 — НЧ Cu ( $10^{-9}$  %) и НБП 5 — НЧ Mn ( $10^{-6}$  %).

Полученные нанобиопрепараты использовали для предпосадочной обработки клубней картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Сантэ. В 2018 году для обработки использовали НБП 1, в 2019 году — НБП 1 и НБП 2; в 2021 году — НБП 3, НБП 4 и НБП 5.

Посадочным материалом были клубни сорта Сантэ с наклюнувшимися глазками, отобранные от одной прогретой и перебранной семенной партии картофеля. Масса посадочных клубней составляла 70-80 г. Перед посадкой клубни обрабатывали опрыскиванием с помощью ранцевого распылителя («Kwazar Corporation Sp. z o.o.», Польша) с нормой расхода рабочей жидкости из расчета 10 л/т. В контрольной группе предпосевная обработка клубней отсутствовала.

Опыт выполняли в условиях почвенно-климатической зоны подзолистых и дерново-подзолистых почв таежно-лесной области Российской Федерации. Экспериментальное поле было предоставлено ФГБНУ ФИЦ

картофеля им. А.Г. Лорха (Люберецкий р-н Московской обл.) и находилось в типичных условиях для центрального региона России. Почва опытного поля — дерново-подзолистая супесчаная.

Посадку картофеля проводили клоновой сажалкой с шириной междурядий 75 см и густотой посадки 400 шт/100 м<sup>2</sup> в I декаде мая в 2018, 2019, 2020 (дополнительный участок без обработки клубней НЧ) и 2021 годах. Схема посадки 75×35 см. Повторность опыта 4-кратная. Размещение делянок рендомизированное. Число учетных растений — 50 шт. в каждой группе. Площадь каждого участка 25 м<sup>2</sup>.

Данные о метеорологических показателях вегетационных периодов 2018, 2019 и 2021 годов были предоставлены метеостанцией «Коренево» (Люберецкий р-н Московской обл.). Измерения проводились ежесуточно. Средние многолетние значения рассчитывали за все годы наблюдений на метеостанции (1955-2017 годы).

При учете распространенности альтернариоза (возбудитель *Alternaria solani* Sorauer) подсчитывали число пораженных растений, на листьях которых образовались сухие коричнево-черные пятна до 1,5 см в диаметре, разбросанные по всей поверхности листовой пластинки. При оценке распространенности ризоктониоза (возбудитель *Rhizoctonia solani* J.G. Kuhn) учитывали растения, у которых наблюдался хотя бы один из перечисленных признаков: опоясывающее поражение нижней части стебля, скрученные вдоль жилки верхние листья, образовавшиеся зеленые воздушные клубни в пазухах побегов, белая ножка (нижняя часть стебля покрыта беловато-сероватой пленкой).

Распространенность альтернариоза и ризоктониоза оценивали по формуле:

$$P = (n \times 100) / N,$$

где  $P$  — распространенность болезни, %;  $n$  — число растений или клубней, пораженных болезнью;  $N$  — число растений или клубней в группе.

Степень развития альтернариоза рассчитывали по формуле:

$$R = \sum bt \times 100 / 7n,$$

где  $R$  — степень развития болезни, %;  $\sum bt$  — сумма произведений балла поражения ( $b$ ) на число растений или клубней ( $t$ ), поражение которых было оценено на соответствующий балл;  $n$  — число растений или клубней в образце; 7 — высшей балл шкалы учета.

Все учеты проводили в соответствии со стандартными методиками (21-23; ГОСТ 33996-2016, М., 2017).

Содержание микроэлементов в клубнях картофеля после предпосевной обработки НБП оценивали методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, квадрупольный масс-спектрометр Nexion 300D, «PerkinElmer, Inc.», США) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP AES Optima 2000 DV emission spectrometer, «PerkinElmer, Inc.», США). Содержание микроэлементов определяли после сбора урожая. Данные представлены в мкг/г сухой массы образца (20).

Статистическую обработку данных осуществляли в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 20 («StatSoft, Inc.», США). Определяли средние значения изучаемых показателей ( $M$ ) и стандартные ошибки средних ( $\pm SEM$ ). Достоверность различий между вариантами ( $p$ ) оценивали методами параметрической ( $t$ -критерий Стьюдента) статистики. Различия между вариантами считали статистически значимыми при  $p \leq 0,05$ .

**Результаты.** В связи с потеплением климата активное распространение в посадках картофеля получил альтернариоз, который особенно

сильно проявляется в жаркую погоду с обильными росами. Болезнь поражает листья, стебли, черешки и клубни. При этом поражаемость ботвы среднеранних, среднеспелых и среднепоздних сортов может составлять 18-77 %, поздних — 16-52 %. Развитию болезни также способствуют недостаток азота, вирусные инфекции, паразиты и другие факторы, ослабляющие растения (20).

Метеорологические показатели вегетационных периодов в годы проведения опытов представлены в таблице 1.

### 1. Метеорологические показатели вегетационных периодов 2018, 2019 и 2021 годов (по данным метеостанции «Коренево», Люберецкий р-н Московской обл.)

Год	Месяц, декада											
	май			июнь			июль			август		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
	Температура воздуха, °С											
Средние многолетние	11,2	13,3	14,6	15,9	17,4	18,4	18,8	19,6	19,4	18,8	17,5	15,7
2018	15,5	17,1	16,6	13,8	18,0	22,3	18,1	22,2	20,95	21,5	19,65	18,5
2019	14,2	15,99	18,7	21,8	20,5	18,7	16,9	15,5	18,2	13,94	17,3	17,2
2021	9,2	18,5	15,6	16,7	21,5	25,9	22,6	25,9	20,6	21,0	21,0	17,4
	Осадки, мм											
Средние многолетние	15,3	15,2	21,8	19,4	21,6	24,2	24,0	27,8	27,5	19,8	22,2	25,5
2018	5,4	45,2	4,2	13,6	8,6	7,7	46,0	29,9	11,3	3,5	13,2	17,3
2019	15,5	37,9	11,0	0,2	5,6	53,8	12,7	81,4	18,5	33,2	22,1	0,4
2021	52,1	6,6	21,2	16,3	3,1	39,2	5,7	14,7	8,2	20,6	38,4	31,9
	Относительная влажность воздуха, %											
Средние многолетние	71,0	74,0	75,0	81,0	81,0	80,0	80,0	80,0	82,0	80,0	85,0	86,0
2018	67,1	71,2	61,3	65,98	65,8	61,5	79,6	81,7	82,85	70,65	72,4	70,0
2019	72,7	65,1	64,8	55,0	62,6	71,6	70,2	88,1	79,2	85,1	87,3	76,8
2021	75,9	69,9	67,0	76,7	76,2	80,8	75,9	70,6	75,1	85,6	85,1	84,8
	Гидротермический коэффициент											
Средние многолетние	1,1-1,3											
2018	0,35	2,8	0,23	1,15	0,48	0,35	2,54	1,35	0,51	0,16	0,67	0,85
2019	1,24	2,37	0,54	0,01	0,27	2,88	0,75	5,24	0,92	2,38	1,28	0,02
2021	11,8	0,36	1,31	0,98	0,14	1,52	0,25	0,57	0,36	0,98	1,83	1,67

Примечание. Средние многолетние показатели рассчитывали за все годы наблюдений на метеостанции (1955-2017 годы).

Средняя температура воздуха за вегетационный период 2018 года составила 18,7 °С, 2019 года — 17,4 °С, 2021 года — 19,7 °С, при норме 16,5 °С. Всего осадков при норме 260,5 мм за вегетационные периоды 2018, 2019 и 2021 годов выпало соответственно 205,9 мм (79,04 % от нормы), 292,3 мм (112,2 % от нормы) и 258,0 мм (99,04 % от нормы). Сумма эффективных температур (выше 10 °С) составила в 2018 году 2318,03 °С, в 2019 году — 2126 °С, в 2021 году — 2354,61 °С. Гидротермический коэффициент (ГТК) в 2018 году составил 0,89 (по уровню влагообеспеченности территории год засушливый), в 2019 году — 1,39 (влажный), в 2021 году — 1,096 (слабозасушливый).

### 2. Метеорологические показатели вегетационных периодов 2018-2021 годов (Люберецкий р-н Московской обл.) и распространенность альтернариоза без обработки клубней нанобиопрепаратами ( $M \pm SEM$ )

Год	Распространенность альтернариоза		Среднесуточная температура воздуха за вегетационный период, °С, $\pm$ к сред-немноголетнему значению (16,5 °С)	Сумма осадков, мм, $\pm$ к сред-немноголетнему значению (260,5 мм)	ГТК
	%	характер			
2018	78,8 $\pm$ 8,1	Э	+2,2	-54,6	0,89
2019	31,2 $\pm$ 3,3	У	+0,9	+31,8	1,39
2020	58,8 $\pm$ 6,1	У-Э	+0,6	+166,6	2,10
2021	100	Э	+3,2	-2,5	1,10

Примечание. ГТК — гидротермический коэффициент. Э — эпифитотия (развитие болезни более чем у 50 % растений), У — умеренное развитие (25-50 %); n (число растений) = 200 для каждого года.

Комплекс метеорологических факторов оказывал существенное влияние на развитие альтернариоза (табл. 2).

За период проведения исследований было выявлено существенное повышение температуры воздуха в сравнении со среднемноголетними значениями, имеющее единую направленность по всей территории Центрального Нечерноземья: в среднем за вегетацию — +0,6–3,2 °С (см. табл. 2). Самыми теплыми были май 2018 года (+3,4 °С), июнь 2021 года (+3,2 °С), июль 2021 года (+3,8 °С). Превышение температур в августе наблюдалось в 2018 и 2021 годах (+2,5–2,6 °С). Сумма эффективных температур (СЭТ) за вегетационный период показала превышение над среднемноголетними показателями (от 254,24 °С в 2020 году до 628,81 °С в 2021 году).

Осадки служат благоприятным фактором для развития растений картофеля и возбудителей болезней. Наименьшее количество осадков выпало в июне 2018 года (–35,3 мм), в июле 2021 года (–33,8 мм), в августе 2018 и 2020 годов (–13,4 мм), наибольшее — в июне 2020 года (+25,4 мм), в июле 2020 года (+4,3 мм), в августе 2021 года (+6,4 мм).

Относительная влажность воздуха играет важную роль в первичном инфицировании листьев болезнями. Наименьшее значение относительной влажности воздуха в среднем за вегетацию отмечали в 2018 году — 70,9 %, то есть наблюдалась воздушная засуха.

Такие агрометеорологические условия вегетационного периода 2018 года были неблагоприятными для роста картофеля, но способствовали развитию альтернариоза, а холодная погода в конце мая и начала лета 2018 года — и ризоктониоза. Агрометеорологические условия вегетационного периода 2019 года оказались относительно удовлетворительными для растений картофеля и благоприятными для развития ризоктониоза; 2021 год в целом был неблагоприятным для растений картофеля, но способствовал развитию альтернариоза.

Разнообразием требований, предъявляемых к нанопорошкам в зависимости от области применения и их свойств, объясняется существование большого числа методов синтеза наночастиц и многообразие самих частиц. При этом оптимальную биологическую активность НЧ проявляют в зависимости от особенностей строения частиц, размера, фазового и элементного состава, толщины оксидной пленки на поверхности (10, 11). Учитывая это, мы синтезировали НЧ с заданными физико-химическими параметрами, что позволяет, учитывая дозозависимый эффект (12), направленно воздействовать на показатели роста и развития растений. По данным РФА, синтезированный нами наноразмерный порошок железа, использованный в составе нанобиопрепаратов, содержал металлическую кристаллическую фазу железа Fe- $\alpha$  (27,9 %) и кристаллическую фазу оксида железа  $\gamma$ -Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит) (72,1 %). Наноразмерный порошок цинка содержал металлическую кристаллическую фазу цинка, оксидных фаз обнаружено не было (однако оксидные фазы могут быть рентгеноаморфны). НЧ Си имели только кристаллическую фазу. НЧ Мо включали металлическую фазу (64,0 %) и карбид димолибдена (36,0 %). НЧ аморфного бора содержали ВН<sub>3</sub>О<sub>3</sub> (90,1 %) и В<sub>2</sub>О (9,9 %). НЧ Mg включали металлическую фазу (79,0 %) и MgO (21,0 %).

Сорт Сантэ, который мы использовали в экспериментах, — среднеранний, универсального назначения, имеет высокую урожайность. Сорт устойчив к раку картофеля (возбудитель гриб *Synchytrium endobioticum*), к золотистой картофельной цистообразующей нематодой (*Globodera rostochiensis*), вирусным болезням, восприимчив по ботве к фитофторозу, среднеустойчив к обыкновенной парше, восприимчив к ризоктониозу и фомозу (<https://potato.professorhome.ru/variety/sante-sante>).

В 2018 году для предпосадочной обработки клубней картофеля ис-

пользовали НБП 1, что позволило уменьшить распространенность альтернариоза на 54,0 % по сравнению с контролем ( $p \leq 0,05$ ), при этом степень поражения снижалась на 58,4 % ( $p \leq 0,05$ ) (табл. 3).

**3. Распространенность и степень поражения альтернариозом (возбудитель *Alternaria solani* Sorauer) растений картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Сантэ после предпосадочной обработки клубней нанобиопрепаратами (НБП) в разные годы ( $n = 200$  в каждой группе,  $M \pm SEM$ ; Люберецкий р-н Московской обл.)**

Год	НБП	Распространенность			Степень поражения	
		инфицировано растений, шт.	доля инфицированных растений от общего числа растений, %	опыт/контроль, %	% поражения одного растения	опыт/контроль, %
2018	Контроль	81,8±7,8	40,9±3,9	100	12,5±1,3	100
	НБП 1	37,6±3,4*	18,8±1,7*	46,0	5,2±0,4*	41,6
2019	Контроль	35,4±3,8	17,7±1,9	100	5,0±0,4	100
	НБП 1	15,4±1,8*	7,7±0,9*	43,5	1,9±0,2*	38,0
	НБП 2	18,6±2,2*	9,3±1,1*	52,5	2,7±0,3*	54,0
2021	Контроль	198,6±17,0	99,3±8,5	100	34,7±3,1	100
	НБП 3	150,4±12,8	75,2±6,4	75,7	18,8±1,7*	54,2
	НБП 4	164,6±14,4	82,3±7,2	82,9	21,6±1,9*	62,2
	НБП 5	140,4±11,4	70,2±5,7	70,7	18,2±1,6*	52,4

Примечание. Состав НБП см. разделе «Методика».

\* Различия с контролем статистически значимы при  $p \leq 0,05$ .

В 2019 году была повторена предпосадочная обработка клубней картофеля НБП 1 и испытан НБП 2. НБП 1 отличался от НБП 2 большим содержанием НЧ железа (соответственно  $10^{-6}$  и  $10^{-8}$  %) и цинка ( $10^{-2}$  и  $10^{-4}$  %). Применение НБП 1 в 2019 году, как и в 2018 году, способствовало снижению распространенности альтернариоза на 56,5 %, а степень поражения уменьшилась по сравнению с контрольными растениями на 62,0 %. НБП 2 снижал распространенность альтернариоза на 47,5 %, степень поражения — на 44 %.

Распространенность ризоктониоза при обработке клубней НБП 1 снизилась на 15 % в 2018 году и почти в 3 раза (как и при обработке НБП 2) ( $p \leq 0,05$ ) — в 2019 году (табл. 4).

**4. Распространенность ризоктониоза (возбудитель *Rhizoctonia solani* J.G. Kuhn) на растениях картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Сантэ после предпосадочной обработки клубней нанобиопрепаратами (НБП) в разные годы ( $n = 200$  в каждой группе,  $M \pm SEM$ ; Люберецкий р-н Московской обл.)**

Год	НБП	Распространенность		
		число заболевших растений, шт.	доля заболевших растений от общего числа растений, %	опыт/контроль, %
2018	Контроль	15,2±1,6	7,6±0,8	100
	НБП 1	13,0±1,4	6,5±0,7	85,5
2019	Контроль	18,2±1,6	9,1±0,8	100
	НБП 1	6,2±0,8*	3,1±0,4*	34,1
2021	НБП 2	6,2±0,8*	3,1±0,4*	34,1
	Контроль	24,0±2,6	12,0±1,3	100,0
	НБП 3	12,0±1,4*	6,0±0,7*	50,0
	НБП 4	6,6±0,4*	3,3±0,2*	27,8
	НБП 5	18,6±1,8	9,3±0,9	77,8

Примечание. Состав НБП см. разделе «Методика».

\* Различия с контролем статистически значимы при  $p \leq 0,05$ .

Следовательно, применение НБП 1 и НБП 2 приводило к достоверному уменьшению степени поражения картофеля альтернариозом, а также распространенности альтернариоза и ризоктониоза. При этом снижение концентрации НЧ железа и НЧ цинка в НБП 2 по сравнению с НБП 1 не вызывало статистически значимых различий в действии этих нанобиопрепаратов на распространенность альтернариоза и ризоктониоза,



однако степень поражения картофеля альтернариозом увеличивалась.

В 2021 году были испытаны три нанобиопрепарата, содержащие НЧ меди, бора, молибдена, магния и марганца. Погодные условия 2021 года способствовали эпифитотийному развитию альтернариоза. Так, к концу вегетации распространение альтернариоза в контрольном варианте достигло 99,3 % при степени поражения 34,7 % (см. табл. 3).

Применение НБП 3, НБП 4 и НБП 5 снизило распространенность альтернариоза картофеля в среднем на 25 %, а степень поражения — на 42 % по сравнению с контролем (см. табл. 3). Изучение распространения ризоктониоза в том же году показало, что применение НБП 5, содержащего в своем составе НЧ Mn ( $10^{-6}$  %), уменьшало этот показатель на 22 % по сравнению с контролем, НБП 3 (НЧ Cu,  $10^{-9}$  % + НЧ В,  $10^{-6}$  % + НЧ Мо,  $10^{-7}$  %) — на 50 %, НБП 4 (НЧ Cu,  $10^{-9}$  %) — на 72 %.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования НЧ микроэлементов в составе полимерного покрытия для предпосадочной обработки клубней картофеля. Гидрофильная полимерная пленка защищала клубни от инфекций и вредителей, предохраняла их от увядания при засухе, предотвращала диффузию НЧ в почву. Микроэлементы в виде НЧ в составе пленки в созданных нами НБП стимулируют рост и развитие растений, активизируют естественные биологические процессы, повышают иммунитет растений, а также защищают картофель от вредителей и болезней.

Влияние НЧ металлов на рост грибов и бактерий изучается многими научными группами. Значительная доля работ посвящена исследованию наночастиц серебра, известными своим антибактериальным действием. Так, НЧ Ag в концентрации 100 мг/л подавляли рост *Alternaria solani* in vitro на  $98,27 \pm 1,58$  % (24). Наночастиц серебра в концентрации 60–120 мг/л ингибировали рост *A. solani*, *Botrytis cinerea* и *Fusarium oxysporum* in vitro соответственно на 70,76; 51,75 и 39,04 % (25). НЧ Ag влияли и на споры *Fusarium culmorum* (WG Smith) Sacc. (FC): для спор, инкубированных с наночастицами серебра наблюдалось значительное снижение роста мицелия (26).

Антибактериальный механизм действия наночастиц зависит как от вида микроорганизмов, на которые оказывается влияние, так и от типа наночастиц. Известно, что медь обладает антимикробными свойствами, иногда превосходящими действие серебра. Так, в отношении клинических полирезистентных штаммов НЧ Cu проявляют большую антибактериальную активность по сравнению с НЧ Ag (27). Поэтому в состав наших нанобиопрепаратов (НБП 1, НБП 2, НБП 3 и НБП 4) входили НЧ меди. Подавление развития патогенов НЧ Cu установлено в ряде работ. Показано, что НЧ Cu в концентрации 500 мг/л ингибировали развитие мицелия *Colletotrichum capsici* на 93,75 % по сравнению со стандартными фунгицидами карбендазимом (на 72,82 % при 500 мг/л) и оксихлоридом меди (на 85,85 % при 2500 мг/л) (28).

В исследовании in vitro (29) НЧ CuO подавляли рост *Phytophthora infestans* на 100 и 60,4 % при концентрации соответственно 30 и 10 мг/л. В теплице наиболее эффективной для борьбы с фитофторозом картофеля была концентрация НЧ CuO 100 мг/л (эффективность 69 %). НЧ ZnO в концентрации 100 мг/л обладали такой же эффективностью (29). Для подавления *Ralstonia solanacearum* — возбудителя бурой гнили картофеля протравливали семена и замачивали клубни картофеля с НЧ CuO в концентрации 0,6 мг/мл. При такой обработке снижение заболеваемости бурой гнилью составляло до 71,2 % по сравнению с 43,0 % при использова-

нии раствора  $\text{CuSO}_4$ . Кроме того, применение НЧ  $\text{CuO}$  значительно увеличило урожайность, общее содержание хлорофилла и активность ферментов картофеля по сравнению с инфицированными контрольными растениями. Сравнимой эффективностью обладали НЧ  $\text{MgO}$  в концентрации 0,75 мг/мл (30).

Медьсодержащие бионаноконпозиты оказывали выраженное влияние на развитие корневой системы картофеля (прирост ее массы достигал 19 %) и стимулирующее действие на антиоксидантную систему. Также они проявляли выраженное антибактериальное действие в отношении фитопатогенной бактерии *Clavibacter sepedonicus* (31). Введение в состав пленки меди — элемента с переменной валентностью, активно участвующего в реакции Хабера-Вейсса и генерирующего высокореакционные  $\cdot\text{OH}$  радикалы, способствует повреждению клеточной стенки фитопатогенов. Кроме того, медь образует устойчивые дисульфидные связи с клеточными белками, что приводит к гибели клеток патогена (32, 33).

В наших биопрепаратах, кроме НЧ меди, содержались НЧ цинка, железа, магния, молибдена, бора и марганца. Антибактериальная активность НЧ цинка, железа, магния показана в ряде исследований. Так, А.А. AlNarethi с соавт. (29) сообщали о противобактериальном действии наночастиц  $\text{ZnO}$ . Опыты, проведенные *in vitro*, продемонстрировали антимикробную активность НЧ  $\text{ZnO}$ , зависящую от их концентрации, против трех бактериальных патогенов картофеля — *R. solanacearum*, *Pectobacterium atrosepticum* и *P. carotovorum*: наибольшая зона ингибирования наблюдалась для *R. solanacearum* при концентрации НЧ  $\text{ZnO}$  5 мкг/мл (34). Обнаружено, что НЧ  $\text{MgO}$  могут защищать картофель от *Phytophthora infestans* при низкой дозировке (50 мкг/мл), вызывая разрушение клеточной оболочки, постоянный окислительный стресс и ингибирование активности мембранного транспорта и метаболических путей в *P. infestans* (35).

Наночастицы железа в зависимости от концентрации способны стимулировать рост или угнетать развитие определенных групп микроорганизмов в почве. Показано, что НЧ  $\text{Fe}$  в дозе 50-250 мг/кг стимулировали рост численности целлюлозоразрушающих микроорганизмов на 5-25 %, с последующим снижением числа микроорганизмов на 10-40 %. Такое стимулирование роста целлюлозолитических бактерий может быть использовано для направленного восстановления почвенного плодородия и, как следствие, повышения урожайности (36). НЧ  $\text{Fe}$  в концентрации 5, 10 мг/л вызывали дозозависимое снижение степени поражения и распространенности *A. solani* (37).

Наши исследования показали, что все изученные нанобиопрепараты уменьшают распространенность и степень поражения картофеля альтернариозом и ризоктониозом. При этом концентрации НЧ, которые использовались в созданных НБП, были в сотни и тысячи раз меньше предложенных другими авторами, что обеспечивает безопасность применения разработанных нами НБП. Для доказательства безопасности НБП после сбора урожая в картофеле было определено содержание железа, цинка и меди, то есть тех микроэлементов, НЧ которых были введены в НБП 1 для предпосадочной обработки клубней. Установлено, что содержание железа в обработанных клубнях картофеля урожая 2018 года составляло  $34,60 \pm 3,90$  мкг/г, меди —  $2,02 \pm 0,20$  мкг/г, цинка —  $9,54 \pm 0,95$  мкг/г. В контрольной группе содержание этих микроэлементов было соответственно  $21,80 \pm 2,18$ ,  $1,88 \pm 0,19$  и  $9,87 \pm 0,99$  мкг/г. То есть применение НБП не вызывало увеличения количества меди и цинка в клубнях и незначительно увеличивало количество железа, что свидетельствует о безопасности при-

менения НБП 1.

Таким образом, использование нанобиопрепаратов в виде композиций НЧ Zn (0,01 %) + НЧ Cu ( $10^{-8}$  %) + НЧ Fe ( $10^{-6}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-8}$  %); НЧ Zn ( $10^{-4}$  %) + НЧ Cu ( $10^{-8}$  %) + НЧ Fe ( $10^{-8}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-8}$  %); НЧ Cu ( $10^{-9}$  %) + НЧ В ( $10^{-6}$  %) + НЧ Mo ( $10^{-7}$  %) + НЧ Mg ( $10^{-6}$  %) или в виде наночастиц НЧ Cu ( $10^{-9}$  %) и НЧ Mn ( $10^{-6}$  %) по отдельности в составе полимеров может быть рекомендовано для предпосадочной обработки клубней картофеля. Установлено, что наночастицы микроэлементов эффективно защищают растения картофеля в течение всего вегетационного периода, что позволяет снизить распространенность фитопатогенов и степень развития инфекции. Наиболее перспективным нанобиопрепаратом для уменьшения степени поражения альтернариозом картофеля и подавления распространения этой болезни, а также ризоктониоза представляется комбинированный нанобиопрепарат 1, имеющий в своем составе НЧ Zn, Cu, Fe и Mo, которые введены в гидрофильную полимерную пленку. Показано, что в клубнях нового урожая не происходит накопления элементов, используемых при предпосевной обработке картофеля в виде НЧ в составе полимерного покрытия. Полученные данные свидетельствуют об экологической безопасности препаратов. Нанобиопрепараты, содержащие НЧ в биотических дозах, могут сократить использование фунгицидов, отравляющих почву и накапливающихся в сельскохозяйственных продуктах.

*Авторы благодарят Министерство образования и науки РФ и сотрудников лаборатории ФИЦ ХФ РАН под руководством А.Н. Жигача за поддержку в проведении экспериментов.*

<sup>1</sup>ФГБУН ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха,

140051 Россия, Московская обл., г.о. Люберцы,  
д.п. Красково, ул. Лорха, 23, литер В,  
e-mail: vzeyruk@mail.ru ✉, coordinazia@mail.ru,  
belov.grischa2015@yandex.ru;

<sup>2</sup>Институт энергетических проблем  
химической физики им. В.Л. Тальрозе,  
ФГБУН ФИЦ химической физики

им. Н.Н. Семенова РАН,

119334 Россия, г. Москва, Ленинский просп., 38, корп. 2,  
e-mail: obogo@mail.ru, iolkhv@gmail.com, nnglu@mail.ru

*Поступила в редакцию*

*20 апреля 2024 года*

*Принята к публикации*  
*28 мая 2024 года*

*Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2025, V. 60, № 1, pp. 165-178*

## EFFECTIVENESS OF USING MICROELEMENTS' NANOPARTICLES TO PROTECT POTATO (*Solanum tuberosum* L.) FROM FUNGAL DISEASES

*V.N. Zeyruk<sup>1</sup> ✉, O.A. Bogoslovskaya<sup>2</sup>, S.V. Vasilyeva<sup>1</sup>, G.L. Belov<sup>1</sup>, M.K. Derevyagina<sup>1</sup>,  
I.P. Olkhovskaya<sup>2</sup>, N.N. Glushchenko<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Russian Potato Research Centre, 23, ul. Lorkha, Kraskovo—Lyubertsy, Moscow Province, Russia 140051, e-mail vzeyruk@mail.ru (✉ corresponding author), coordinazia@mail.ru, belov.grischa2015@yandex.ru;

<sup>2</sup>Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics of Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS, 38/2, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia 119334, e-mail obogo@mail.ru, iolkhv@gmail.com, nnglu@mail.ru  
ORCID:

Zeyruk V.N. orcid.org/0000-0002-9930-4463

Bogoslovskaya O.A. orcid.org/0000-0003-1632-4010

Vasilyeva S.V. orcid.org/0000-0002-9930-4463

Belov G.L. orcid.org/0000-0002-3002-8173

Derevyagina M.K. orcid.org/0000-0003-3179-4723

Olkhovskaya I.P. orcid.org/0000-0003-2322-7868

Glushchenko N.N. orcid.org/0000-0002-0227-9282

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

The authors express their gratitude to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the staff of the laboratory of the Federal Research Center of Chemical Physics RAS headed by A.N. Zhigach for support in conducting the experiments.

## Abstract

Annual yield losses due to potato diseases can reach up to 30 %. For instance, rhizoctoniosis has been shown to reduce crop productivity by 20–25 % while early blight has been observed to cause losses of up to 40 %. Achieving high yields is only possible through the implementation of effective potato protection measures, such as the use of nanoparticles (NPs) of microelements. In the present study, novel nanobiopreparations comprising various combination of Fe, Zn, Cu, Mo, Mg, Mn, and B NPs in the composition of polymers for pre-planting treatment of potato tubers were developed. The efficacy of micronutrient NPs in protecting potato plants throughout the entire growing season was demonstrated, thereby reducing the prevalence and severity of phytopathogen development. The objective of this study was to undertake a comparative analysis of the impact of a pre-planting tuber treatment with formulations comprising varying metal nanoparticle compositions on potato lesions caused by early blight and rhizoctoniosis. The metal nanoparticles used in the study were obtained through a high-temperature condensation at the Migen-3 facility (Semenov FRC of Chemical Physics RAS). Fe, Zn, Cu, Mo, Mg, Mn, and B metal nanoparticles were used. The NPs were single-crystal structures of spherical shape with an oxide film on the surface, which was formed as a result of passivation of particles with air to reduce the pyrophoricity of NPs. The preparation procedure involved dispersing the metal particles in water using an ultrasonic disintegrator (Scientz JY 92-IIN, Scientz Biotechnology, China). The obtained suspensions were added to a polymer mixture solution comprising 0.5 % sodium salt of carboxymethylcellulose, 1 % polyethylene glycol-400, and sodium salt of diethyldiaminotetraacetic acid (0.0000375 %). Fungicide Maxim (Syngenta AG, Switzerland) was then added. The obtained solutions were sonicated and used for a pre-planting treatment of potato (*Solanum tuberosum* L.) Santé variety tubers. We created five nanobiological preparations (NBPs) containing equivalent quantities of polymers into which the trace element NPs had been incorporated. NBP 1 was NP Zn 0.01 % + NP Cu 10<sup>-8</sup> % + NP Fe 10<sup>-6</sup> % + NP Mo 10<sup>-8</sup> %. NBP 2 was NP Zn 10<sup>-4</sup> % + NP Cu 10<sup>-8</sup> % + NP Fe 10<sup>-8</sup> % + NP Mo 10<sup>-8</sup> %. NBP 3 was NP Cu 10<sup>-9</sup> % + NP B 10<sup>-6</sup> % + NP Mo 10<sup>-7</sup> % + NP Mg 10<sup>-6</sup> %. NBP 4 was NP Cu 10<sup>-9</sup> % and NBP 5 was NP Mn 10<sup>-6</sup> %. The test field (Lorkh Russian Potato Research Centre) was located in typical conditions for the Central Russia (Lyuberetsky District, Moscow Province). The soil of the test field is sod-podzolic sandy loam. Potato planting was conducted in the first decade of May in 2018, 2019, 2020 and 2021. The planting tubers were sprayed using a knapsack equipment (Kwazar Corporation Sp. z o.o., Poland) with a rate of working fluid consumption of 10 l/t. The prevalence of early blight (*Alternaria solani* Sorauer) and rhizoctoniosis (*Rhizoctonia solani* J.G. Kuhn) of potato, as well as the degree of early blight development, were recorded. The findings demonstrated that NBP 1 in 2018 and 2019 significantly reduced the incidence of early blight with a decrease of 54.0 and 56.5 %, respectively, compared to the control. Additionally, the extent of lesion reduced by 58.4 and 62.0 %, respectively. NBP 2 in 2019 reduced the early blight prevalence by 47.5% and the lesion extent by 44.0 %. The use of NBP 3, NBP 4 and NBP 5 in 2021 resulted in a decline in the prevalence of early blight with a 25 % average reduction. Additionally, the severity of lesions decrease by 42 % vs control. As to the prevalence of rhizoctoniosis, NBP 1 in 2018 led to its 15.0 % reduction, and in 2019 reduced it 3 times like NBP 2. The application of NBP 5 (2021) resulted in a 22.0 % reduction in lesion severity vs control; NBP 3 reduced it by 50.0 %, NBP 4 by 72.0 %. The most promising nanobiopreparation to reduce the lesions upon potato early blight infection and to suppress spreading early blight and rhizoctoniosis is a combined nanobiopreparation NBP 1 containing Zn, Cu, Fe and Mo NPs introduced into a hydrophilic polymer film. The tubers of the new crop did not accumulate elements used in the form of NPs in NBP which attests to the ecological safety of NP preparations.

Keywords: potato, early blight, *Alternaria solani*, *Rhizoctonia solani*, prevalence, degree of lesions, metal nanoparticles, boron nanoparticles.

## REFERENCES

1. Zeyruk V.N., Zhevorra S.V., Vasil'eva S.V., Belov G.L., Dolzhenko V.I., Kuznetsova M.A., Anisimov B.V., Elanskiy S.N. *Atlas bolezney, vrediteley, sornyakov kartofelya i meropriyatiya po bor'be s nimi* [Atlas of potato diseases, pests, weeds and measures to combat them]. Moscow, 2020 (in Russ.).
2. Kokaeva L.Yu., Belosokhov A.F., Elanskiy S.N. *Zashchita kartofelya*, 2019, 1: 9-13 (in Russ.).
3. Bogoslovskaya O.A., Ol'khovskaya I.P., Nechitaylo G.S., Glushchenko N.N. *Khimicheskaya fizika*, 2022, 41(12): 60-65 (in Russ.).
4. Duhan J.S., Kumar R., Kumar N., Kaur P., Nehra K., Duhan S. Nanotechnology: the new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, 2017, 15: 11-23 (doi:

- 10.1016/j.btre.2017.03.002).
5. Pradhan S., Mailapalli D.R. Interaction of engineered nanoparticles with the agri-environment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(38): 8279-8294 (doi: 10.1021/acs.jafc.7b02528).
  6. Elsharkawy M.M., Derbalah A. Antiviral activity of titanium dioxide nanostructures as a control strategy for broad bean strain virus in faba bean. *Pest. Manag. Sci.*, 2019, 75(3): 828-834 (doi: 10.1002/ps.5185).
  7. Alghuthaymi M.A., Almoammar H., Rai M., Said-Galiev E., Abd-Elsalam K.A. Myconanoparticles: synthesis and their role in phytopathogens management. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2015, 29(2): 221-236 (doi: 10.1080/13102818.2015.1008194).
  8. El-Temsah Y.S., Joner E.J. Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil. *Environ. Toxicol.*, 2012, 27(1): 42-49 (doi: 10.1002/tox.20610).
  9. Feng Y., Cui X., He S., Dong G., Dong G., Chen M., Wang J., Lin X. The role of metal nanoparticles in influencing arbuscular mycorrhizal fungi effects on plant growth. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(16): 9496-9504 (doi: 10.1021/es402109n).
  10. Yurina T.A., Drobin G.V., Bogoslovskaya O.A., Olkhovskaya I.P., Glushchenko N.N. Stimulating effects of pre-sowing seed treatment with metal nanoparticles on winter wheat growth and development. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2021, 56(1): 135-145 (doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.135rus).
  11. Glushchenko N.N., Bogoslovskaya O.A., Shagdarova V.T., Il'ina A.V., Olkhovskaya I.P., Varlamov V.P. Searching for synergistic effects of low-molecular weight chitosan derivatives, chitosan and copper nanoparticles for wound healing ointment. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2021, 12: 035016 (doi: 10.1088/2043-6262/ac2b98).
  12. Zeyruk V.N., Vasilieva S.V., Belov G.L., Derevyagina M.K., Bogoslovskaya O.A., Olkhovskaya I.P., Yablokov A.G., Glushchenko N.N. A boost to integrated management of certain potato diseases using metal nanoparticles. *Potato Res.*, 2021, 65: 273-288 (doi: 10.1007/s11540-021-09518-9).
  13. Hänsch R., Mendel R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, 12(3): 259-266 (doi: 10.1016/j.pbi.2009.05.006).
  14. Elrys A.S., Abdo A.I.E., Desoky E.M. Potato tubers contamination with nitrate under the influence of nitrogen fertilizers and spray with molybdenum and salicylic acid. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 7076-7089 (doi: 10.1007/s11356-017-1075-y).
  15. Lebedeva T.N. *Ekologo-agrokhimicheskie aspekty mineral'nogo pitaniya kartofelya na seroy lesnoy pochve. Kandidatskaya dissertatsiya* [Ecological and agrochemical aspects of potato mineral nutrition on gray forest soil. PhD Thesis]. Pushchino, 2015 (in Russ.).
  16. Koch M., Naumann M., Pawelzik E., Gransee A., Thiel H. The importance of nutrient management for potato production. Part I: Plant nutrition and yield. *Potato Res.*, 2020, 63: 97-119 (doi: 10.1007/s11540-019-09431-2).
  17. Koch M., Winkelmann M.K., Hasler M., Pawelzik E., Naumann M. Root growth in light of changing magnesium distribution and transport between source and sink tissues in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Sci. Rep.*, 2020, 10(1): 8796 (doi: 10.1038/s41598-020-65896-z).
  18. Khalaeva V.I., Volchkevich I.G., Konopatskaya M.V., Vabishchevich V.V. *Zashchita rasteniy*, 2022, 46(1): 153-163 (doi: 10.47612/0135-3705-2022-46-153-163) (in Russ.).
  19. Leipunsky I.O., Zhigach A.N., Kuskov M.L., Berezkina N.G., Afanasenkova E.S., Kudrov B.V., Lopez G.W., Vorobjeva G.A., Naumkin A.V. Synthesis of TiH<sub>2</sub> nanopowder via the Guen-Miller Flow-Levitation method and characterization. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 778: 271-279 (doi: 10.1016/j.jallcom.2018.11.088).
  20. Skal'nyy A.V. *Mikroelementy v meditsine*, 2003, 4(1): 55-56 (in Russ.).
  21. Zhevora S.V., Zeyruk V.N., Belov G.L., Vasil'eva S.V., Derevyagina M.K., Anisimov B.V., Starovoytov V.I., Starovoytova O.A., Mishurov N.P., Nemenushchaya L.A., Manokhina A.A., Piskunova N.A. *Peredovye metody diagnostiki patogenov kartofelya: nauchnyy analiticheskiy obzor* [Advanced diagnostic methods for potato pathogens: a scientific analytical review]. Moscow, 2019 (in Russ.).
  22. Zhevora S.V., Fedotova L.S., Starovoytov V.I., Zeyruk V.N., Korshunov A.V., Pshechenkov K.A., Timoshina N.A., Mal'tsev S.V., Starovoytova O.A., Vasil'eva S.V., Shabanov A.E., Derevyagina M.K., Belov G.L., Kiselev A.I., Knyazeva E.V. *Metodika provedeniya agrotekhnicheskikh opytov, uchetov, nablyudeniy i analizov na kartofele* [Methodology for conducting agrotechnical experiments, records, observations and analyses on potatoes]. Moscow, 2019 (in Russ.).
  23. Volovik A.S., Trofimets L.N., Dolyagin A.B., Glez V.M. *Metodika issledovaniy po zashchite kartofelya ot bolezney, vreditely, sornyakov i immunitetu* [Research methodology for protecting potatoes from diseases, pests, weeds and immunity]. Moscow, 1995 (in Russ.).
  24. Khatoun J., Mehmood A., Khalid A.U.R., Khan M.A.R., Ahmad K.S., Anjad M.S., Bashir U., Raffi M., Proćków J. Green-fabricated silver nanoparticles from *Quercus incana* leaf extract to control the early blight of tomatoes caused by *Alternaria solani*. *BMC Plant Biol.*, 2024, 24(1):

302 (doi: 10.1186/s12870-024-05008-5).

25. Vera-Reyes I., Altamirano-Hernández J., Reyes-de la Cruz H., Granados-Echegoyen C.A., Loera-Alvarado G., López-López A., García-Cerda L.A., Loera-Alvarado E. Inhibition of phytopathogenic and beneficial fungi applying silver nanoparticles in vitro. *Molecules*, 2022, 27(23): 8147 (doi: 10.3390/molecules27238147).
26. Kasproicz M.J., Koziol M., Gorczyca A. The effect of silver nanoparticles on phytopathogenic spores of *Fusarium culmorum*. *Canadian Journal of Microbiology*, 2010, 56(3): 247-53 (doi: 10.1139/w10-012).
27. Gudkova E.S., Udegova E.S., Gil'deeva K.A., Rukosueva T.V., S'ed B. *Infektsiya i immunitet*, 2021, 11(4): 771-776 (doi: 10.15789/2220-7619-MNA-1359) (in Russ.).
28. Iliger K.S., Sofi T.A., Bhat N.A., Ahanger F.A., Sekhar J.C., Elhendi A.Z., Al-Huqail A.A., Khan F. Copper nanoparticles: Green synthesis and managing fruit rot disease of chilli caused by *Colletotrichum capsici*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(2): 1477-1486 (doi: 10.1016/j.sjbs.2020.12.003).
29. AlHarethi A.A., Abdullah Q.Y., AlJobory H.J., Anam A.M., Arafa R.A., Farroh K.Y. Zinc oxide and copper oxide nanoparticles as a potential solution for controlling *Phytophthora infestans*, the late blight disease of potatoes. *Discover Nano*, 2024, 19(1): 105 (doi: 10.1186/s11671-024-04040-6).
30. Rabea A., Naeem E., Balabel N.M., Daigham G.E. Management of potato brown rot disease using chemically synthesized CuO-NPs and MgO-NPs. *Bot. Stud.*, 2023, 64(1): 20 (doi: 10.1186/s40529-023-00393-w).
31. Khutsishvili S.S., Perfilava A.I., Kon'kova T.V., Lobanova N.A., Sadykov E.K., Sukhov B.G. copper-containing bionanocomposites based on natural raw arabinogalactan as effective vegetation stimulators and agents against phytopathogens. *Polymers*, 2024, 16(5): 716 (doi: 10.3390/polym16050716).
32. Boxi S.S., Mukherjee K., Paria S. Ag doped hollow TiO<sub>2</sub> nanoparticles as an effective green fungicide against *Fusarium solani* and *Venturia inaequalis* phytopathogens. *Nanotechnology*, 2016, 27(8): 085103 (doi: 10.1088/0957-4484/27/8/085103).
33. Saharan V., Sharma G., Yadav M., Choudhary M.K., Sharma S.S., Pal A., Raliya R., Biswas P. Synthesis and in vitro antifungal efficacy of Cu-chitosan nanoparticles against pathogenic fungi of tomato. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 75: 346-353 (doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.01.027).
34. Hamdy E., Al-Askar A.A., El-Gendi H., Khamis W.M., Behiry S.I., Valentini F., Abd-Elsalam K.A., Abdelkhalek A. Zinc oxide nanoparticles biosynthesized by *Eriobotrya japonica* leaf extract: characterization, insecticidal and antibacterial properties. *Plants*, 2023, 12(15): 2826 (doi: 10.3390/plants12152826).
35. Wang Z.L., Zhang X., Fan G.J., Que Y., Xue F., Liu Y.H. Toxicity effects and mechanisms of MgO nanoparticles on the oomycete pathogen *Phytophthora infestans* and its host *Solanum tuberosum*. *Toxics*, 2022, 10(10): 553 (doi: 10.3390/toxics10100553).
36. Gavrish I.A., Lebedev S.V. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nanotekhnologii v sel'skom khozyaystve: perspektivy i riski»* [Proc. Int. Conf. «Nanotechnology in agriculture: prospects and risks»]. Orenburg, 2018: 71-76 (in Russ.).
37. Anwaar S., Ijaz D.E., Anwar T., Qureshi H., Nazish M., Alrefaei A.F., Almutairi M.H., Alharbi S.N. Boosting *Solanum tuberosum* resistance to *Alternaria solani* through green synthesized ferric oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles. *Sci. Rep.*, 2024, 14(1): 2375 (doi: 10.1038/s41598-024-52704-1).