

**ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ
КАРТОФЕЛЯ *IN VITRO*, КУЛЬТИВИРУЕМЫХ НА СРЕДАХ
С НАНОКОМПОЗИТАМИ ГИДРОКСИДА МАРГАНЦА И ОКСИДА
МЕДИ В АРАБИНОГАЛАКТАНОВОЙ МАТРИЦЕ**

© 2023 г. А. И. Перфильева^{1,*}, Т. В. Липчанская², А. Р. Харасова², О. А. Ножкина¹,
Т. Е. Путилина¹, А. В. Сидоров^{1,3}, Т. В. Конькова⁴, Б. Г. Сухов⁴

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Иркутский государственный медицинский университет, Иркутск, Россия

⁴Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия

*E-mail: alla.light@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 18.08.2023 г.

Изучена биологическая активность химически синтезированных нанокмозитов (НК) на основе наночастиц (НЧ) оксида меди(I) (НК $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG}$) и гидроксида марганца (НК $\text{Mn}(\text{OH})_2/\text{AG}$) на основе природной полимерной матрицы арабиногалактан (AG) с целью разработки нового ростостимулятора для растений картофеля. Растения картофеля выращивали на питательной среде, в которую вместо солей $\text{CuSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ добавляли соответствующие НК по отдельности или их смесь. Обнаружено, что НК $\text{Mn}(\text{OH})_2/\text{AG}$ в концентрации 0.0132% как самостоятельно, так и в комплексе с НК $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG}$ в концентрации 0.0084% стимулировал прирост на 20% по сравнению с контрольными растениями картофеля *in vitro*. Этот НК усиливал рост растений картофеля за счет удлинения междоузлий; увеличивал биомассу корней и надземной части. Биомасса корней при выращивании растений на среде с двумя НК была на 70% выше, чем в контроле. Стимуляция увеличения количества пигментов под влиянием этого НК. Содержание каротиноидов под влиянием марганецсодержащего НК повышалось на 40%. Обработка исследуемым НК снижала количество активных форм кислорода в тканях корней от 35 до 68% благодаря повышенной активности антиоксидантных ферментов. Активность каталазы повышалась от 16 до 120% по сравнению с контролем. Эти данные и ранее полученные результаты свидетельствуют о перспективности изучения НК марганца в качестве ростостимулятора культурных растений.

DOI: 10.56304/S1992722323030093

ВВЕДЕНИЕ

В связи с глобальным изменением климата наблюдается расширение ареала обитания фитопатогенных микроорганизмов в мире на северные и восточные территории [1]. Это приводит к увеличению использования пестицидов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [2]. Обозначенные проблемы свидетельствуют о необходимости поиска эффективных и экологически безопасных веществ для регуляции численности фитопатогенных бактерий и грибов.

В настоящее время активно исследуется биологический синтез субмикро- и наночастиц (НЧ), способных найти применение в самых разных областях. Перспективны препараты, используемые в агрохимии, содержащие элементы, относящиеся к макро-

микро- и ультрамикроэлементам. Функциональные полимерные наносоединения находят широкое применение в ветеринарии и растениеводстве, являются основой медико-биологических препаратов с разнообразными видами активностей (антимикробной, противогрибковой, противовирусной, противоопухолевой и т.д.), обладающих антиоксидантным и иммуномодулирующим действием [3–13]. Свойства таких материалов во многом определяются полимерной матрицей (низкая токсичность, гидрофильность, биосовместимость, биологическая активность, термическая и химическая стойкость), а также параметрами наноразмерной фазы (размеры, форма, дисперсность и пространственная локализация), что определяет возрастающий интерес к кон-

тролируемому синтезу подобных гибридных материалов [14, 15].

Необходимость поиска новых биологических препаратов сельскохозяйственного назначения не оставляет сомнений. Разнообразие применяемых синтетических средств, как правило, обладает только фунгицидной активностью, не имея бактерицидного эффекта, кроме того, они вызывают развитие микробной устойчивости к этим средствам и токсичны для человека и обитателей окружающей среды. Кроме того, металлы, необходимые для растительного организма, в виде НЧ поглощаются растением более эффективно по сравнению с обычными солями.

Ранее была изучена биологическая активность нанокмозитов (НК) селена, серебра, марганца, упакованных в природные полимерные матрицы (каррагинан, арабиногалактан (АГ), крахмал, гуминовые вещества). Выявлено, что эти агенты снижают жизнеспособность фитопатогенной бактерии *Clavibacter sepedonicus* и фитопатогенных грибов р. *Phytophthora* [16]. Часть исследуемых химически синтезированных НК стимулирует рост и развитие картофеля *in vitro*, прорастание семян культурных растений (соя, горох, картофель) [17]. При этом показано, что после обработки растений НК в их тканях селен не накапливался [18–20]. Кроме того, химически синтезированные НК на основе природных полимерных матриц не угнетали жизнеспособность почвенных микроорганизмов, что свидетельствует об относительной безопасности для реального применения [16].

Настоящая работа направлена на изучение новых НК на основе соединений НЧ меди и марганца с арабиногалактаном для применения в области сельскохозяйственных технологий, в частности ростостимуляторов растений и агентов для оздоровления растений от фитопатогенных грибов и бактерий.

МЕТОДЫ

Нанокмозиты были синтезированы в Институте химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (г. Новосибирск). АГ получен из полисахарида лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb (ООО «Химия древесины», Иркутск, Россия) [21], прошел дополнительную очистку от примесей и флавоноидов пропусканием через полиамидную колонку. АГс получен модификацией исходного АГ по патенту [22].

НК синтезировали согласно следующим процедурам.

Марганецсодержащие нанокмозиты. НК $Mn(OH)_2/AGc$: сульфатированный арабиногалактан (АГс) (2 г, 22 кДа) растворяли в дистиллированной H_2O (6 мл) и $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ (0.3 г) в H_2O

(2 мл) добавляли к раствору. Затем добавляли NH_4OH (0.2 мл) при перемешивании магнитной мешалкой. Через 4 ч реакционную смесь осаждали в спирт и высушивали. Промывка спиртом дала 1.8 г НК $Mn(OH)_2/AGc$. Содержание НЧ Mn в образце НК, определенное рентгеновским энергодисперсионным микроанализом, составило 4.8%. При микроскопическом исследовании АГ не визуализировался. Нанокмозит представлял собой электронно-контрастные НЧ марганца размером в диапазоне от 2 до 12 нм. Большинство НЧ имело величину 3–6 нм (рис. 1).

Медьсодержащие нанокмозиты. НК медь–арабиногалактан-сырец (Cu_2O/AG) синтезировали по следующей методике. К раствору 1 г арабиногалактана в 6 мл воды при интенсивном перемешивании приливали 2 мл водного раствора $CuCl_2$, содержащего 0.09 г $CuCl_2 \cdot 2H_2O$, выдерживали 30 мин при 320 К, затем добавляли 5 мл водного раствора, содержащего 0.08 г $NaBH_4$ и 0.003 г $NaOH$, выдерживали реакционную смесь 3 ч при интенсивном перемешивании и фильтровали через бумажный фильтр. Целевой продукт выделяли из фильтрата и очищали от низкомолекулярных примесей двухкратным пересаживанием из этилового спирта, высушивали в вакууме. Содержание НЧ Cu в образце НК, определенное рентгеновским энергодисперсионным микроанализом, составило 7.5%. Нанокмозит представлял собой электронно-контрастные НЧ меди диаметром до 30 нм. Более половины НЧ имели величину 5–10 нм (рис. 1).

Схема эксперимента. НК вносили в виде компонентов микросолей среды Мурасиге–Скуга, где соль $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ заменяли на НК $Mn(OH)_2/AGc$, массовая доля растворенного вещества составляла 0.0132%. Соль $CuSO_4 \cdot 4H_2O$ заменяли на НК Cu_2O/AG , массовая доля растворенного вещества составляла 0.0084%. Такие концентрации НК были подобраны экспериментально и соответствуют концентрации 0.000625% НЧ в конечном растворе. Эта концентрация обладает негативным эффектом по отношению к фитопатогенной бактерии *C. sepedonicus* [23]. Микрклональное размножение пробирочных растений *in vitro* сорта Лукьяновский осуществляли с помощью черенкования. Контрольные растения выращивали на среде Мурасиге–Скуга стандартного состава. Растения культивировали в факторостатных условиях в течение 52 сут при 26°C и освещенности 5–6 клК. Каждые 7 сут проводили измерения длины растений и подсчет количества листьев.

По окончании эксперимента снимали биометрические показатели: массу корней, массу надземной части растений, длину междоузлий, а также проводили биохимические исследования: определение содержания активных форм кислорода (АФК) в тканях корней, измерение уровня

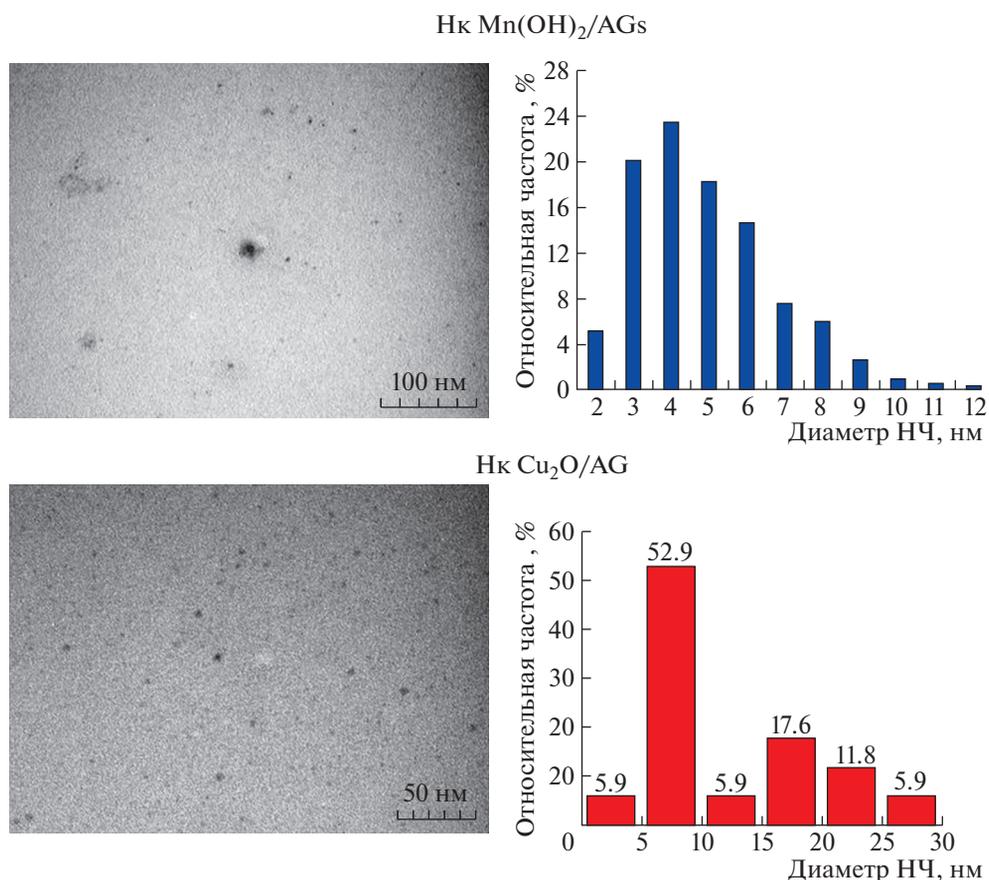


Рис. 1. Фото НК $Mn(OH)_2/AGs$ и НК Cu_2O/AG , гистограммы распределения по размерам НЧ.

активности антиоксидантных ферментов (АОФ) – пероксидазы и каталазы в тканях листьев и корней, содержание малонового диальдегида (МДА), содержание пигментов.

Содержание АФК, а именно перекиси водорода, в растительных образцах определяли спектрофотометрически с использованием красителя ксиленоловый оранжевый [24]. Этот метод определения пероксида водорода основан на окислении ионов железа Fe^{+2} перекисью водорода до ионов железа Fe^{+3} , которые образуют окрашенные соединения с ксиленоловым оранжевым. Активность общей гваяколзависимой пероксидазы определяли по методу Бояркина [25]. Анализ активности каталазы в растениях проводили с помощью спектрофотометрии путем проведения цветной реакции между перекисью водорода и молибдатом аммония с измерением оптической плотности продуктов реакции при $\lambda = 470$ нм [26]. Концентрацию МДА определяли по методу Heath, Packer (1968) с применением 20%-ной трихлоруксусной кислоты и 0.5%-ного раствора тиобарбитуровой кислоты [27]. Пигменты экстрагировали 80%-ным ацетоном, их количество определяли на спектрофотометре Specord S 100 («Analytik Jena», Германия). Содержание хлорофилла и карраги-

нана рассчитывали по формулам Vernon и Wettstein в расчете на единицу сырого веса листа [28].

Статистическую обработку данных провели с применением программы MS Excel. Полученные данные были статистически сопоставлены с использованием непараметрического U -критерия Манна–Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты показали, что НК не оказывали выраженного негативного влияния на рост растений (рис. 2а). При этом длина растений, выросших на среде с $Mn(OH)_2/AGs$, была больше по сравнению с контролем в течение всего периода эксперимента. Начиная с 28 сут наблюдения отмечена стимуляция прироста растений под влиянием $Mn(OH)_2/AGs + Cu_2O/AG$. Не выявлено выраженных различий по количеству листьев у исследуемых растений (рис. 2б).

Отмечено достоверное стимулирование биомассы корней под влиянием всех НК, а также их смеси (табл. 1). Биомасса надземной части и длина междоузлий у растений, выросших на среде с НК $Mn(OH)_2/AGs$, были выше, чем в контроле, в отличие от НК Cu_2O/AG , который снижал данные

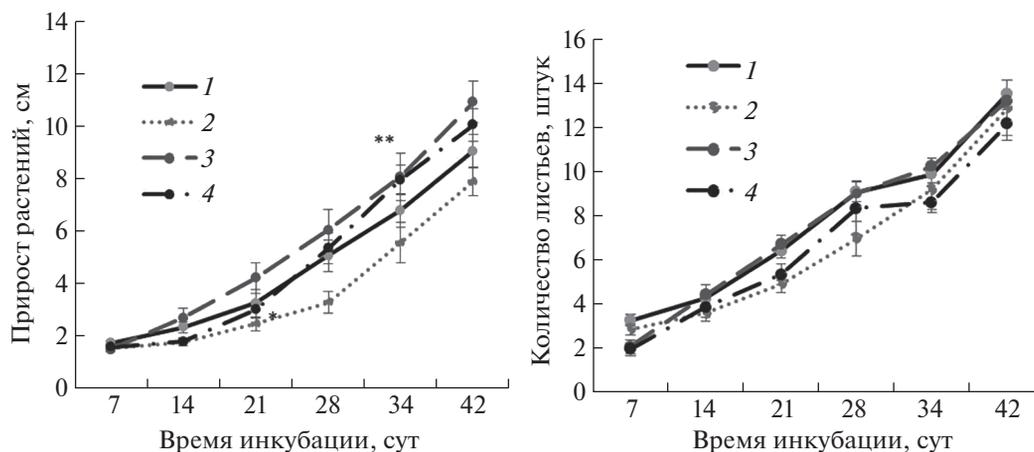


Рис. 2. Влияние $Mn(OH)_2/AG$ и Cu_2O/AG на прирост и количество листьев картофеля *in vitro*: растения, выращенные на питательной среде Мурасиге–Скуга (контроль) (1), на питательной среде с внесением НК Cu/AG (2), НК $Mn(OH)_2/AG$ (3), НК $Mn(OH)_2/AG$ и НК Cu_2O/AG (4); ** $p \leq 0.05$, значение находится в зоне значимости по *U*-критерию Манна–Уитни.

показатели. При использовании смеси данных НК ($Mn(OH)_2/AG$ + Cu_2O/AG) масса надземной части уменьшилась незначительно, а длина междоузлий увеличилась в сравнении с контролем (табл. 1).

Для оценки влияния НК на статус антиоксидантной системы растений исследовали накопление АФК в тканях корней картофеля. На рис. 3 отображены полученные результаты. Содержание АФК во всех вариантах было ниже по сравнению с контролем, в варианте НК $Mn(OH)_2/AG$ + НК Cu_2O/AG этот эффект демонстрируется ярче всех.

Далее проанализировали изменение активности АОФ в тканях картофеля под влиянием НК. В качестве АОФ были выбраны пероксидаза и каталаза. На рис. 4 представлены данные об активности пероксидазы в тканях корней (а) и листьев (б). Обнаружено достоверное снижение исследуемого показателя в варианте “НК Cu_2O/AG ”. Под влиянием НК $Mn(OH)_2/AG$ отмечено повышение активности пероксидазы в тканях корней картофеля. Однако культивирование картофеля на среде, содержащей “смесь НК”, снова приводило к снижению активности пероксидазы в тканях корней (рис. 4а). Исследование активности фермента в тканях листьев показало снижение

изучаемого параметра во всех экспериментальных вариантах по сравнению с контролем (рис. 4б).

Вторым значимым ферментом антиоксидантной системы является каталаза. Для оценки действия стресса было оценено содержание каталазы в тканях корней и листьев картофеля *in vitro*. По результатам, представленным на рис. 5, видно, что в тканях листьев активность каталазы во всех вариантах НК выше, чем в контроле (а), в тканях корней изменений не наблюдалось (б).

Результатом влияния стрессового фактора являются процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ), происходящие вследствие повреждения липидов мембран растительных клеток избыточным количеством АФК. Конечным продуктом ПОЛ является МДА. В тканях корня выявлено достоверное увеличение содержания МДА под влиянием как НК Cu_2O/AG , так и НК $Mn(OH)_2/AG$ (рис. 6). Однако совместное их введение в питательную среду не вызывало повышения исследуемого показателя. В тканях листьев содержание МДА повышалось только под влиянием НК Cu_2O/AG .

Считается, что увеличение роста высших растений под воздействием НК может происходить благодаря повышению продуктивности фотосинтеза. Поэтому в качестве биохимических показате-

Таблица 1. Влияние НК на морфометрические признаки картофеля *in vitro*

	Масса корней, г	Масса надземной части, г	Длина междоузлий, см
К	0.44 ± 0.15	0.66 ± 0.04	0.89 ± 0.03
НК Cu/AG	0.52 ± 0.14**	0.58 ± 0.04	0.84 ± 0.03
НК Mn/AG	0.63 ± 0.22**	0.65 ± 0.03	0.92 ± 0.03
НК Cu/AG + НК Mn/AG	0.75 ± 0.19**	0.64 ± 0.04	0.95 ± 0.03

** Достоверные отличия от контроля, $p < 0.05$ по *U*-критерию Манна–Уитни.

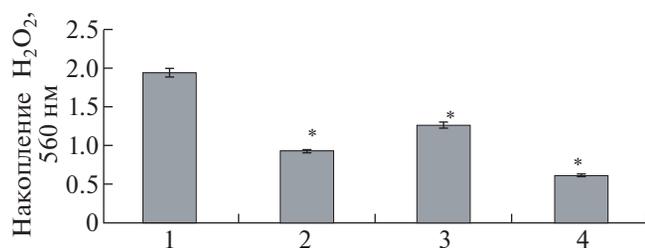


Рис. 3. Содержание АФК в тканях корней картофеля *in vitro*: растения, выращенные на питательной среде Мурасиге–Скуга (контроль) (1), на питательной среде с внесением НК Cu/АГ (2), НК Mn(OH)₂/АГс (3), НК Mn(OH)₂/АГс и НК Cu₂O/АГ (4); * $p \leq 0.01$, значение находится в зоне значимости по *U*-критерию Манна–Уитни.

телей состояния растений было исследовано содержание пигментов в тканях листьев картофеля, выращенного на средах с НК (рис. 7). Результаты показали, что Mn(OH)₂/АГс увеличивал содержание каротиноидов, а НК Mn(OH)₂/АГс + НК Cu₂O/АГ снижали содержание хлорофилла *b* (рис. 7). Остальные НК не оказывали стимулирующего эффекта на содержание фотосинтетических пигментов в тканях растений картофеля *in vitro*.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для лучшего понимания эффектов НК на растения полученные данные были систематизированы в табл. 2.

В настоящей работе показано, что Mn(OH)₂/АГс самостоятельно и в комплексе с НК Cu₂O/АГ стимулировал прирост растений картофеля (рис. 2а), при этом стимуляция происходила благодаря удлинению междоузлий растений (табл. 1) Стимуляцию биометрических параметров растений под влиянием НЧ изучали на различных объектах. Например, НЧ оксида цин-

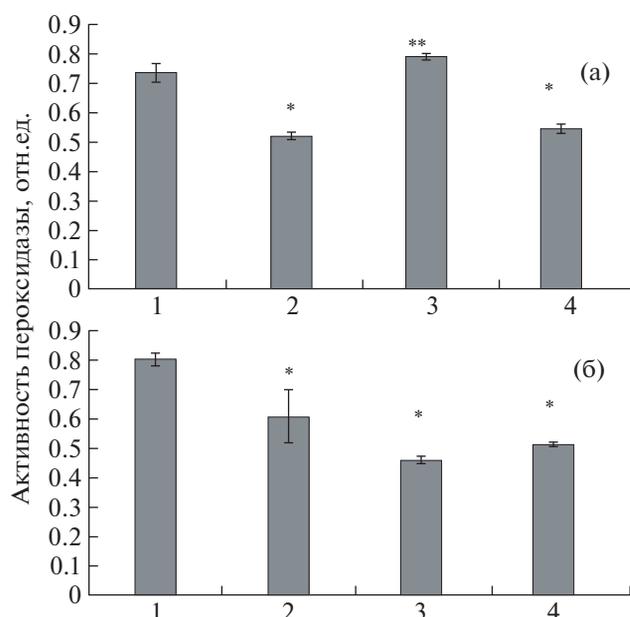


Рис. 4. Активность пероксидазы в тканях корней (а) и листьев (б) картофеля *in vitro*: растения, выращенные на питательной среде Мурасиге–Скуга (контроль) (1), на питательной среде с внесением НК Cu/АГ (2), НК Mn(OH)₂/АГс (3), НК Mn(OH)₂/АГс и НК Cu₂O/АГ (4); * $p \leq 0.01$, ** $p \leq 0.05$, значение находится в зоне значимости по *U*-критерию Манна–Уитни.

ка (ZnO) и железа (Fe) стимулировали высоту растений, длину колосьев, а также сухую массу побегов, корней и зерен пшеницы *Triticum aestivum* [29], у этой же культуры марганецсодержащие НК стимулировали повышение урожайности на 18% [10]. НЧ CuO стимулировали рост огурцов *Cucumis sativus* [30], биомассу растений томатов *Solanum lycopersicum* и их урожайность [7]. Кроме того, отмечено достоверное стимулирование биомассы корней под влиянием всех НК (табл. 1). Эти данные подтверждают сведения об уве-

Таблица 2. Обобщение результатов исследования

	НК Cu ₂ O/АГ	НК Mn(OH) ₂ /АГс	НК Mn(OH) ₂ /АГс + + НК Cu ₂ O/АГ
Прирост растений	снижение	стимуляция	стимуляция
Масса корней	стимуляция	стимуляция	стимуляция
Накопление H ₂ O ₂ в тканях корня	снижение	снижение	снижение
Активность пероксидазы (корни/листья)	снижение	повышение/снижение	снижение
Активность каталазы (корни/листья)	нет эффекта/повышение	нет эффекта/повышение	нет эффекта/повышение
Содержание МДА (корни/листья)	повышение	повышение/нет эффекта	нет эффекта
Содержание пигментов	нет эффекта	повышение содержания каротиноидов	снижение содержания хлорофилла <i>b</i>

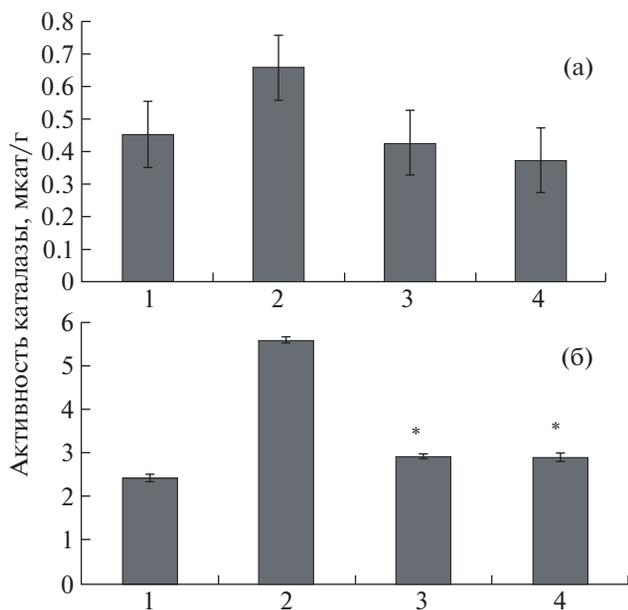


Рис. 5. Активность каталазы в тканях корней (а) и листьев (б) картофеля *in vitro*: растения, выращенные на питательной среде Мурасиге–Скуга (контроль) (1), на питательной среде с внесением НК Cu/АГс (2), НК Mn(OH)₂/АГс (3), НК Mn(OH)₂/АГс и НК Cu₂O/АГс (4); * $p \leq 0.01$, ** $p \leq 0.05$, значение находится в зоне значимости по *U*-критерию Манна–Уитни.

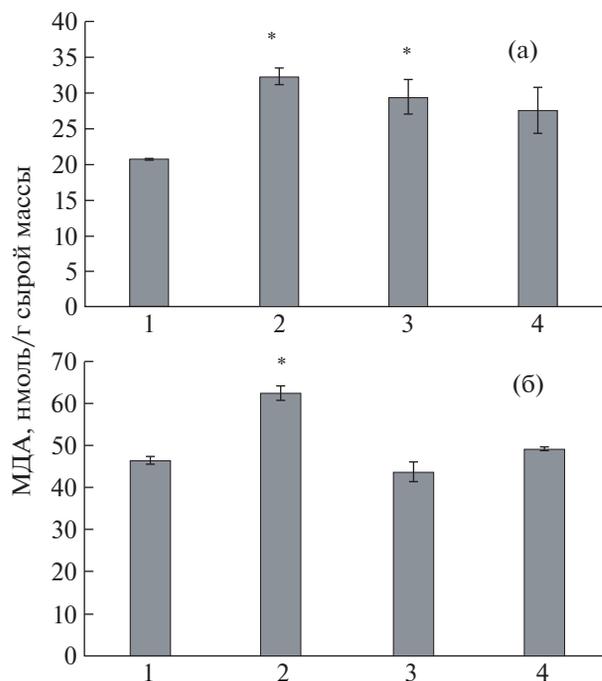


Рис. 6. Содержание малонового диальдегида в тканях корней (а) и листьев (б) картофеля *in vitro*: растения, выращенные на питательной среде Мурасиге–Скуга (контроль) (1), на питательной среде с внесением НК Cu/АГс (2), НК Mn(OH)₂/АГс (3), НК Mn(OH)₂/АГс и НК Cu₂O/АГс (4); * $p \leq 0.01$, значение находится в зоне значимости по *U*-критерию Манна–Уитни.

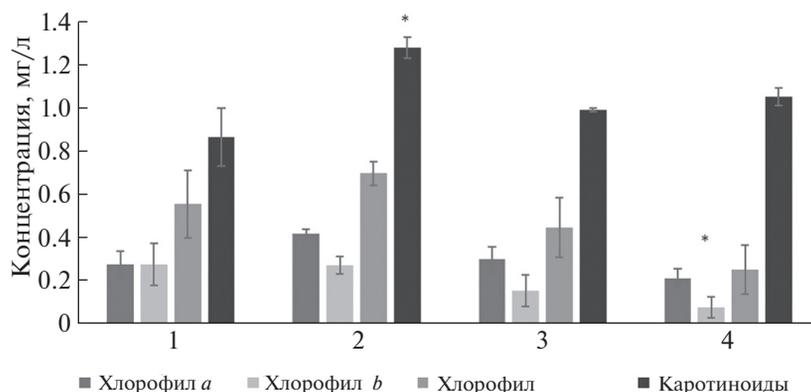


Рис. 7. Содержание фотосинтетических пигментов в тканях листьев картофеля *in vitro*: растения, выращенные на питательной среде Мурасиге–Скуга (контроль) (1), на питательной среде с внесением НК Cu/АГс (2), НК Mn(OH)₂/АГс (3), НК Mn(OH)₂/АГс и НК Cu₂O/АГс (4); * $p \leq 0.01$, значение находится в зоне значимости по *U*-критерию Манна–Уитни.

личении корнеобразования под влиянием НЧ. Это хорошо известный эффект НЧ [31, 32].

В качестве биохимических показателей влияния медь- и марганецсодержащих НК на растения картофеля исследовали компоненты окислительно-восстановительной системы растительной клетки: содержание АФК, активность АОФ: пероксидазы и каталазы и содержание МДА в тканях корней и листьев. Каталаза и пероксидаза разлагают перекись водорода и поэтому являются

первым уровнем защиты от разрушающего действия АФК [33]. Они максимально снижают концентрацию супероксид-аниона и пероксида водорода в клетке и не позволяют им вступать в реакции с образованием гидроксилоксидного аниона [34]. Каталаза является гидропротеидом и имеет в качестве небелковой группы окисленный гем. Одна молекула каталазы способна расщеплять несколько миллионов молекул H₂O₂ в секунду. Однако каталаза имеет низкое сродство к перекиси водорода, из-за этого начинает функциониро-

вать только при высоком ее содержании в клетке [35]. Пероксидазы являются одним из самых важных ферментов антиоксидантной системы растительной клетки. Группа этих ферментов включает в себя множество классов в зависимости от функций, выполняемых в клетке [36]. В проведенных исследованиях выявлено, что активность пероксидазы практически во всех изученных пробах растений, выращенных на средах с НК, снижалась по сравнению с контролем (рис. 4). Эти данные коррелируют с результатами по содержанию АФК в тканях корней (рис. 3). Под влиянием НК содержание АФК снижалось, что может быть связано с антиоксидантным эффектом НЧ. Было проведено исследование [37], продемонстрировавшее, что внесение НЧ селена в растения, предварительно подверженные абиотическому стрессу, значительно снижало продуцирование АФК. Показано *in vivo*, что НЧ оксида церия способны каталитически инактивировать АФК [38].

При анализе данных об активности каталазы в тканях картофеля было выявлено, что в листьях активность фермента повышалась под влиянием всех НК. Повышение активности антиоксидантных ферментов в тканях растений ранее наблюдало под влиянием НЧ селена [39].

Разница по эффекту НК на активность антиоксидантных ферментов может быть связана с их функциями. Оба этих фермента катализируют окислительные процессы, играют значительную роль в дыхании растений. Каталаза и пероксидаза утилизируют перекись водорода и тем самым являются передовой линией защиты от токсического действия АФК. При этом основная функция пероксидазы – окисление органических соединений в растениях (полифенолы и ароматические соединения) с помощью перекиси водорода или других органических перекисей [40], а основная функция каталазы – разложение перекиси водорода на воду и молекулярный кислород [35].

Увеличение роста высших растений под воздействием НЧ может происходить благодаря повышению продуктивности фотосинтеза [4, 41]. Растения с повышенной фотосинтетической активностью и эффективностью фотосинтеза формируют высокую и качественную урожайность с меньшим использованием химических средств защиты растений, более эффективно потребляют воду и элементы минерального питания, меньше зависят от изменений в окружающей среде [42]. Результаты проведенного исследования показали, что $Mn(OH)_2/Ag$ увеличивал содержание каротиноидов, а НК $Mn(OH)_2/Ag + Cu_2O/Ag$ снижали содержание хлорофилла *b* (рис. 7). Подобный эффект снижения хлорофилла *b* описан в [43], где обработка семян Яровой пшеницы *T. aestivum* L. НЧ никеля в концентрациях 0.0125–1 М приводила к снижению количества хлорофилла *b*

в листьях. В другом эксперименте влияние НЧ CuO на растения отличалось от контрольных повышенным содержанием каротиноидов на 14.5%. На содержание хлорофилла *a* отрицательное влияние оказывали НЧ CuO (снижение относительно контроля на 22.0–33.0%), хлорофилла *b* – НЧ NiO (снижение на 16.0–68.0%) [44]. На проростках пшеницы *T. aestivum* L. показано увеличение содержания каротиноидов после обработки семенного материала марганецсодержащими НК [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов демонстрируют, что из ряда исследуемых веществ наибольшей биологической активностью для оздоровления культурных растений и повышения их продуктивности обладает НК $Mn(OH)_2/Ag$. Он стимулировал рост растений картофеля за счет удлинения междоузлий, увеличивал биомассу корней и надземной части. Стимуляция увеличения биомассы может быть связана с повышением интенсивности фотосинтеза благодаря повышению количества пигментов под влиянием этого НК. Обработка НК снижала количество АФК в тканях корней благодаря повышенной активности пероксидазы. В [16] показано, что марганецсодержащие НК не оказывают выраженно негативного эффекта на жизнеспособность почвенных бактерий.

В [18–20] были проведены исследования биологической активности НК селена в природных полимерных матрицах. Показано отсутствие или низкое накопление НЧ селена в тканях картофеля *in vitro* после его обработки НК селена. Результаты полевых экспериментов демонстрируют стимуляцию продуктивности картофеля и уменьшение инфицированных клубней в составе урожая, полученных после предпосадочной обработки семенного материала НК [45].

На основании опубликованных данных и ранее полученных нами результатов по исследованию эффекта НК селена на растения в естественных условиях вегетации можно заключить, что внесение НК металлов, в частности марганецсодержащих наносоединений, к культурным растениям в качестве ростостимулятора представляет интерес для применения в агрохимии.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базового проекта «Изучение молекулярных механизмов физиологических процессов и аллелопатии в растительно-микробных отношениях» (программы № 0277-2021-0004 (121031300011-7)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г. др. // *Агрохимия*. 2021. № 1. С. 79. <https://doi.org/10.31857/S0002188121010063>
2. Захаренко В.А. // *Агрохимия*. 2022. № 1. С. 50. <https://doi.org/10.31857/S0002188122010112>
3. Youssef F.S., El-Banna H.A., Elzorba H.Y. et al. // *Int. J. Vet. Sci. Med.* 2019. V. 7. № 1. P. 78. <https://doi.org/10.1080/23144599.2019.1691379>
4. Ye Y., Medina-Velo I.A., Cota-Ruiz K. et al. // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019. V. 184. 109671. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109671>
5. El-Sayed A., Kamel M. // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2020. V. 27. № 16. P. 19073. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3913-y>
6. Zhao L., Lu L., Wang A. et al. // *J. Agric. Food. Chem.* 2020. V. 68. № 7. P. 1935. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>
7. Shen Y., Borgatta J., Ma C. et al. // *J. Agric. Food Chem.* 2020 V. 68 (41). P. 11327. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04546>
8. El-Abeid S.E., Ahmed Y., Daròs J.A. et al. // *Nanomaterials (Basel)*. 2020. V. 10 (5). 1001. <https://doi.org/10.3390/nano10051001>
9. Ekanayake S.A., Godakumbura P.I. // *ACS Omega*. 2021. V. 6 (40). P. 26262. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03271>
10. Zarinkoob A., Esmailzadeh Bahabadi S., Rahdar A. et al. // *Environ. Monit. Assess.* 2021. V. 193 (12). P. 800. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09506-z>
11. Neme K., Nafady A., Uddin S. et al. // *Heliyon*. 2021. V. 7. № 12. e08539. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08539>
12. Mabrouk M., Das D.B., Salem Z.A. et al. // *Molecules*. 2021. V. 26. № 4. P. 1077. <https://doi.org/10.3390/molecules26041077>
13. Fu D., Ding Y., Guo R. et al. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2022. V. 195. P. 538. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.022>
14. Albanese A., Tang P., Chan C. // *Annu Rev. Biomed. Eng.* 2012. V. 14. P. 1. <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071811-150124>
15. Jeevanandam J., Barhoum A., Chan Y.S. et al. // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2018. V. 9. P. 1050. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>
16. Perfilieva A.I., Tsivileva O.M., Nozhkina O.A. et al. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 2274. <https://doi.org/10.3390/nano11092274>
17. Нурминский В.Н., Perfilieva A.I., Капустина И.С. и др. // *Докл. РАН*. 2020. Т. 495. № 1. С. 607. <https://doi.org/10.1134/S1607672920060113>
18. Perfilieva A.I., Nozhkina O.A., Третьякова М.С. и др. // *Российские нанотехнологии*. 2020. Т. 15. № 1. С. 108. <https://doi.org/10.1134/S199272232001015X>
19. Nozhkina O.A., Perfilieva A.I., Graskova I.A. и др. // *Российские нанотехнологии*. 2019. Т. 14. № 5–6. С. 74. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-5-6-74-81>
20. Graskova I.A., Perfilieva A.I., Nozhkina O.A. и др. // *Химия растительного сырья*. 2019. № 3. С. 345. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2019034794>
21. Ганенко Т.В., Танцырев А., Сапожников А.Н. и др. // *Gen Chem. (in Russian)*. 2015. Т. 85. С. 477. <https://doi.org/10.1134/S1070363215020206>
22. Костыро Я.Т., Ганенко Т.В., Медведева С.А. и др. Способ получения сульфатированных производных арабиногалактана, обладающих антикоагуляционной и гиполипидемической активностью. Патент № 2319707 С1 (Россия). 2007.
23. Khutsishvili S.S., Perfilieva A.I., Nozhkina O.A. et al. // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22 (21). 12006. <https://doi.org/10.3390/ijms222112006>
24. Bindschedler L.V., Minibayeva F., Gardner S.L. et al. // *New Phytologist*. 2001. V. 151. P. 185.
25. Бояркин А.Н. // *Биохимия*. 1951. Т. 16. № 4. С. 352.
26. Королюк М.А., Иванова Л.И., Майорова Н.О. и др. // *Лабораторное дело*. 1988. № 1. С. 16.
27. Heath R.L., Packer L. // *Arch. Biochem. Biophys.* 1968. V. 125. P. 189. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
28. Гавриленко В.Ф., Ладыгина М.Е., Хандобина Л.М. // *Большой практикум по физиологии растений*. М.: Высш. шк., 1975. С. 392.
29. Rizwan M., Ali S., Ali B. et al. // *Chemosphere*. 2019. V. 214. P. 269. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.120>
30. Zong X., Wu D., Zhang J. et al. // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022. V. 29. № 46. P. 69517. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20662-8>
31. Юркова И.Н., Омельченко А.В., Пидгайная Е.С. // *Ученые записки КФУ. Биология. Химия*. 2018. № 4. С. 283.
32. Венжик Ю.В., Мошков И.Е., Дыкман Л.А. // *Физиология растений*. 2021. Т. 68. № 3. С. 245. <https://doi.org/10.31857/S0015330321020202>
33. Gomes M.P., Kitamura R.S.A., Marques R.Z. et al. // *Antioxidants*. 2022. V. 11. № 1. P. 151. <https://doi.org/10.3390/antiox11010151>
34. Chioti V., Zervoudakis G. // *Antioxidants*. 2017. V. 6. № 2. P. 39. <https://doi.org/10.3390/antiox6020039>
35. Palma J.M., Mateos R.M., López-Jaramillo J. et al. // *Redox Biology*. 2020. V. 34. 101525. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101525>
36. Pandey V.P., Awasthi M., Singh S. et al. // *Biochem. Anal. Biochem.* 2017. V. 6. P. 308. <https://doi.org/10.4172/2161-1009.1000308>
37. Qi W.Y., Li Q., Chen H. et al. // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 5. P. 417. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125900>
38. Newkirk G.M., Wu H., Santana I., Giraldo J.P. // *J. Vis. Exp.* 2018. V. 26. P. 138. <https://doi.org/10.3791/58373>
39. Zahedia S.M., Abdelrahman M., Hosseini M.S. et al. // *Environ. Pollut.* 2019. V. 253. P. 246. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.078>

40. *Рогожин В.В.* // Пероксидаза растений: строение, механизм действия, активный центр, использование пероксидазы. LAP LAMBERT Acad. Publ. 2010. С. 210.
41. *Feng T., Chen S., Gao D. et al.* // *Photosynthetica*. 2015. V. 53. P. 609.
<https://doi.org/10.1007/s11099-015-0118-1>
42. *Baslam M., Mitsui T., Hodges M. et al.* // *Front. Plant. Sci.* 2020. V. 11. P. 882.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00882>
43. *Зотикова А.П., Астафурова Т.П., Буренина А.А. и др.* // *Сельскохозяйственная биология*. 2018. Т. 53. № 3. С. 578.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.3.578rus>
44. *Короткова А.М., Лебедев С.В., Каюмов Ф.Г. и др.* // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 1. С. 172.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.172rus>
45. *Perfileva A.I., Graskova I.A., Sukhov B.G. et al.* // *Agronomy*. 2022. V. 12. 1281.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12061281>