

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 57.044; 581.19; 581.14

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-15-26>

Поступила в редакцию 01.09.2022

Received 01.09.2022

Н. А. Еловская¹, Ж. Н. Калацкая¹, Н. А. Ламан¹, К. С. Гилевская²,
А. Н. Красковский², В. И. Куликовская²

¹Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

²Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ХИТОЗАНОМ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ (*SOLANUM TUBEROSUM* L.) В КУЛЬТУРЕ *IN VITRO*

Аннотация. В статье рассматривается влияние нанокompозитов (НК) на основе серебросодержащего хитозана, массовое соотношение хитозан-Ag 50:1 (Хит-Ag 50:1) и 100:1 (Хит-Ag 100:1), внесенных в питательную среду культивирования в разведениях 1:500 и 1:1000, на развитие микропобегов и микроклонов картофеля сорта Бриз (*Solanum tuberosum* L.). При клонировании растений-регенерантов картофеля и культивировании микропобегов непосредственно на модифицированных питательных средах выявлен ингибирующий эффект НК на развитие микроклонов, индукции ризогенеза не наблюдалось. При пересадке 3-недельных микроклонов картофеля с развитой корневой системой на питательные среды, модифицированные НК Хит-Ag 50:1, выявлено замедление роста и развития микроклонов по сравнению с контролем и при внесении хитозана. Включение Хит-Ag 100:1 в питательную среду не влияло на рост микроклонов по сравнению с контролем, однако биомасса корней снижалась по сравнению с таковой при внесении чистого хитозана. Сохранение содержания пролина на уровне контрольного варианта при снижении количества образующейся перекиси водорода свидетельствует об отсутствии стрессовой реакции сформированных микроклонов картофеля на исследуемые хитозан-Ag нанокompозитные смеси. Вероятно, более плотная оболочка, образующаяся при увеличении массового содержания хитозана в НК, способствует замедлению генерации ионов серебра Ag⁺ и снижает их токсичность.

Ключевые слова: картофель, хитозан, серебросодержащие нанокompозиты, *in vitro*, рост и развитие, фотосинтетические пигменты, пролин, перекись водорода

Для цитирования: Влияние стабилизированных хитозаном наночастиц серебра на физиолого-биохимическое состояние растений картофеля (*Solanum tuberosum* L.) в культуре *in vitro* / Н. А. Еловская [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 15–26. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-15-26>

Ninel A. Yalouskaya¹, Joanna N. Kalatskaja¹, Nikolai A. Laman¹, Kseniya S. Hileuskaya²,
Aliaksandr N. Kraskouski², Viktoryia I. Kulikouskaya²

¹V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF CHITOSAN-STABILIZED SILVER NANOPARTICLES ON THE PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL STATE OF POTATO PLANTS (*SOLANUM TUBEROSUM* L.) IN *IN VITRO* CULTURE

Abstract. The article contains the results of study of the influence of added to culture medium silver-containing chitosan-based nanocomposites (Chitosan-Ag) at a dilution of 1:500 and 1:1000 (the mass ratio of the components is 50:1 for Chit-Ag 50:1 and 100:1 for Chit-Ag 100:1) on the development of potato microshoots and microclones with a formed root system. Potato microshoots cultivated for 4 weeks on nutrient medium modified with nanocomposites were characterized by slow development and the absence of rhizogenesis, which indicates the toxic effect of the studied nanocomposite concentrations. When replacing the standard nutrient medium with nanocomposites modified for a potato microclone with developed roots, the Chit-Ag 50:1 reduced the rate of growth and development of microclones compared to control and pure chitosan. The Chit-Ag 100:1 nanocomposite had no influence on the microclone growth compared to the control, but reduced the root biomass compared to chitosan. The preservation of photosynthetic pigments and proline concentrations with decreasing the hydrogen peroxide level indicates the absence of the toxic effect of silver-containing chitosan-based nanocomposites on the formed potato microclones. The chitosan concentration increase in the nanocomposite composition helps us to reduce the toxic effect due to the formation of a dense stabilizing shell that delays the silver ion generation.

Keywords: potato, chitosan, silver-containing nanocomposites, *in vitro*, growth and development, photosynthetic pigments, proline, hydrogen peroxide

For citation: Yaloukaya N. A., Kalatskaja J. N., Laman N. A., Hileuskaya K. S., Kraskouski A. N., Kulikouskaya V. I. Influence of chitosan-stabilized silver nanoparticles on the physiological and biochemical state of potato plants (*Solanum tuberosum* L.) in *in vitro* culture. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 15–26 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-1-15-26>

Введение. Актуальным направлением современных исследований в области физиологии растений является изучение биологической активности новых препаратов для растениеводства на основе природного сырья, обладающих полифункциональными свойствами. Благодаря своему природному происхождению такие препараты легко включаются в экосистему, не нарушая взаимосвязей между ее элементами и не увеличивая пестицидную нагрузку. Даже в малых дозах они могут оказывать существенное положительное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур, на их устойчивость к условиям среды, продуктивность и качество получаемой продукции. Наличие пролонгированного действия способствует сохранению эффекта в течение всего периода вегетации.

В качестве активного вещества таких препаратов рассматривают соединения на основе хитозана. Хитозан является производным хитина – основного компонента клеточной стенки грибов и экзоскелета артропод [1]. Хитозан легко подвергается химической модификации, что позволяет повысить эффективность препаратов на его основе за счет включения в его структуру различных физиологически активных соединений (например, органических кислот и др.), и достаточно быстро разлагается в окружающей среде [2, 3]. Хитозан обладает иммуностимулирующей активностью [4], снижает вероятность проникновения в клетки и распространения грибных, бактериальных и вирусных патогенов [5, 6]. Использование хитозана в качестве внекорневой подкормки в условиях открытого грунта или в качестве активного компонента питательной среды в условиях *in vitro* оказывает стимулирующий эффект на многие физиологические процессы растений, в том числе на синтез вторичных метаболитов, рост и продуктивность [2, 7–9].

Несмотря на то что во многих странах активно используются препараты, содержащие в качестве действующего вещества хитозан (например, Экогель, Biochit, Elexa), создание новых формуляций сопряжено с определенными трудностями. Эффект хитозана и его производных зависит от многих факторов: молекулярной массы, степени полимеризации и дезацетилирования, концентрации, вида растения, химического состава почвы и условий окружающей среды [10, 11].

Бактерицидное действие серебра известно давно. Однако только с развитием нанотехнологий биогенные металлы стали широко использоваться в сельском хозяйстве. На сегодняшний день препараты так называемой серебряной линейки зарегистрированы для применения в сельском хозяйстве России (Зеребра Агро, Зерокс), Средней Азии, странах Восточной Европы. Действующим веществом таких препаратов являются наночастицы (НЧ) серебра, стабилизированные с помощью биоразлагаемых и безопасных поверхностно-активных веществ.

НЧ серебра менее токсичны, чем ионы Ag^+ [12, 13], однако эффект НЧ определяется не только входящими в их состав веществами, но также их размером и концентрацией [14]. Немаловажную роль играет возраст и вид растения, условия проведения эксперимента и его продолжительность [13].

Частицы коллоидного серебра, модифицированные биологически активным полимером, оказывают комплексное действие: прямое (биоцидное) на патоген и косвенное (элиситорное) на растение. Механизм биоцидного действия НЧ заключается в нарушении работы мембранных белков клетки патогена, приводящем к ее гибели, а при взаимодействии с клеточной стенкой растений отмечаются активация синтеза активных форм кислорода (АФК) и запуск сигнальных реакций, связанных с формированием приобретенной системной устойчивости [15].

Несмотря на множество проведенных исследований взаимодействия НЧ серебра с растительными организмами, полученные данные весьма противоречивы [16].

Основная часть опубликованных исследований фокусируется на оценке эффекта обработки семян или опрыскивания листьев саженцев растворами, содержащими НЧ серебра в виде коллоидной взвеси, на отдельных физиолого-биохимических аспектах процессов роста и развития, однако практически отсутствуют исследования с использованием культуры *in vitro*.

В связи с этим актуальными представляются исследования о влиянии НЧ серебра, стабилизированных с помощью природного элиситора – хитозана, на процессы роста и развития сельскохозяйственных культур *in vitro*.

Культура *in vitro* представляет собой информативную модельную систему, которая позволяет исследовать метаболические процессы и реакции растительного организма на определенное воздействие, нивелируя другие, в строго контролируемых условиях.

Цель данной работы – изучение влияния наноконпозитов на основе серебросодержащего хитозана на морфометрические и биохимические показатели микроклонов растений картофеля в культуре *in vitro* в оптимальных условиях.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись растения-регенеранты картофеля среднераннего сорта Бриз белорусской селекции, предоставленные РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству».

В качестве соединений, потенциально обладающих ростстимулирующим действием, использовали синтезированные в Институте химии новых материалов НАН Беларуси наноконпозиты (НК) Хитозан-Ag, массовое соотношение хитозан:Ag в которых составляло 50:1 (Хит-Ag 50:1) и 100:1 (Хит-Ag 100:1). Первоначальные концентрации компонентов НК составляли: $c_{\text{хит}} = 15,5$ мг/мл и $c_{\text{Ag}} = 0,31$ мг/мл для Хит-Ag 50:1, $c_{\text{хит}} = 31$ мг/мл и $c_{\text{Ag}} = 0,31$ мг/мл для Хит-Ag 100:1. Начальная концентрация раствора хитозана – 31 мг/мл.

Исследование влияния выбранных НК на ростовые и биохимические показатели проводили в два этапа, различающихся условиями проведения эксперимента.

Этап 1. Материнские растения-регенеранты картофеля клонировали в стерильных условиях ламинар-бокса. Полученные микропобеги помещали на питательную среду Мурасиге–Скуга (МС-среда) [17] (агар – 14 г/л, сахароза – 30 г/л, аскорбиновая и никотиновая кислоты – по 1,0 мг/л, индолил-3-уксусная кислота – 0,5 мг/л, кинетин – 0,25 мг/л, pH = 5,6–5,8) согласно схеме: контроль (МС-среда без добавления хитозана и НК на его основе); контроль 2 (МС-среда с добавлением хитозана, 30 кДа; в разведении 1:500); варианты № 1 и № 2 (МС-среды с добавлением НК Хит-Ag 50:1 и Хит-Ag 100:1 в разведении 1:500 соответственно); контроль 3 (МС-среда с добавлением хитозана, 30 кДа в разведении 1:1000); варианты № 4 и № 5 (МС-среды с добавлением НК Хит-Ag 50:1 и Хит-Ag 100:1 в разведении 1:1000).

Растения выращивали при температуре 23–25 °С, освещенности 3000 лк и фотопериоде 16/8 ч (день/ночь) в течение 4 недель, после чего оценивали влияние внесенных в питательную среду соединений на основе хитозана на морфометрические показатели микроклонов.

Этап 2. Материнские растения картофеля клонировали в стерильных условиях ламинар-бокса. Полученные микропобеги помещали на стандартную МС-среду и выращивали в течение 3 недель, после чего измеряли длину стебля и корня, подсчитывали число междоузлий микроклонов картофеля и проводили замену агаризованной МС-среды на жидкую согласно схеме: контроль (МС-среда без добавления хитозана и НК на его основе); хитозан (МС-среда с добавлением хитозана, 30 кДа; в разведении 1:500); Хит-Ag 50:1 (МС-среда с добавлением НК Хит-Ag 50:1 в разведении 1:500); Хит-Ag 100:1 (МС-среда с добавлением НК Хит-Ag 100:1 в разведении 1:500).

На 21-е сутки проводили повторное измерение морфометрических показателей. Затем растительный материал фиксировали в жидком азоте и оценивали влияние внесенных в питательную среду соединений на основе хитозана на накопление основных фотосинтетических (ФС) пигментов и уровень развития оксидативного стресса по содержанию перекиси водорода (H_2O_2) и пролина.

ФС пигменты экстрагировали 100 %-ным ацетоном и рассчитывали согласно формулам А. А. Шлыка [18]. Содержание перекиси водорода (H_2O_2) определяли по цветной реакции с ксиленовым оранжевым [19], уровень пролина – по цветной реакции с нингидрином при нагревании [20]. Длину стебля и корней измеряли с помощью линейки. Массу стебля и корней определяли путем взвешивания на аналитических весах. Относительную скорость роста рассчитывали по формуле

$$v_{\text{рост}} = (a_2 - a_1) / t a_1 \cdot 100 \%,$$

где $v_{\text{рост}}$ – относительная скорость роста, %; a_1 – длина стебля при первом измерении, см; a_2 – длина стебля при втором измерении, см; t – время, сут [21].

Статистическую обработку результатов осуществляли в программе Statistics 22. Количественные данные проверяли на нормальность распределения с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Различия между вариантами оценивали при помощи однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим сравнением частных средних по тесту Дункана. Результаты представлены в виде $M \pm Sd$ (где M – среднее арифметическое значение, Sd – стандартное отклонение) трех биологических повторностей. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$. Буквами латинского алфавита a, b, c, d отмечено наличие достоверных различий между вариантами.

Результаты и их обсуждение. Ранее полученные результаты [22] показали, что внесенные в МС-среду НК в разных концентрациях (для Хит-Аг 50:1 при разведении 1:100 $c_{\text{хит}} = 0,155$ мг/мл, $c_{\text{Аг}} = 3,1$ мкг/мл и при разведении 1:250 $c_{\text{хит}} = 0,062$ мг/мл, $c_{\text{Аг}} = 1,24$ мкг/мл) оказывают негативный эффект на рост и развитие микропобегов картофеля. Также был отмечен ингибирующий эффект вносимых НК на процессы ризогенеза микроклонов картофеля. В связи с этим было решено уменьшить концентрацию НК Хит-Аг 50:1 и Хит-Аг 100:1, вносимых в МС-среду, а также изменить условия проведения эксперимента.

Этап 1. МС-среда с добавлением НК Хит-Аг 50:1 и Хит-Аг 100:1 в разведении 1:500 и 1:1000.

Несмотря на снижение концентрации, НК на основе серебросодержащего хитозана оказывают негативный эффект на рост и развитие микроклонов растений картофеля.

Длина стебля и число междоузлий микроклонов картофеля, культивируемых на МС-средах с добавлением НК, достоверно снизились как по сравнению с контролем, так и по сравнению с микроклонами, культивированными на среде с хитозаном (контроль 2 и 3) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Влияние нанокмпозитов хитозан-Аг на длину стебля и число междоузлий растений картофеля в культуре *in vitro*

Table 1. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on stem length and number of internodes of microclone potato plants in *in vitro* culture

Вариант	Стебель		Междоузлия	
	Длина, см	Снижение, %	Число, шт.	Снижение, %
Разведение 1:500				
Контроль	$3,6 \pm 0,16^a$	–	$6,0 \pm 0,20^a$	–
Контроль 2	$3,0 \pm 0,06^b$	16,7	$3,7 \pm 0,12^b$	38,3
Вариант № 1	$0,7 \pm 0,01^c$	80,6	$1,9 \pm 0,12^c$	68,3
Вариант № 2	$1,3 \pm 0,05^d$	63,9	$3,4 \pm 0,20^b$	43,3
Разведение 1:1000				
Контроль	$3,6 \pm 0,16^a$	–	$6,0 \pm 0,20^a$	–
Контроль 3	$2,4 \pm 0,16^b$	33,3	$4,1 \pm 0,12^b$	31,7
Вариант № 4	$0,6 \pm 0,08^c$	83,3	$2,1 \pm 0,31^c$	65,0
Вариант № 5	$0,8 \pm 0,14^c$	77,8	$2,1 \pm 0,31^c$	65,0

Аналогичный эффект хитозан и НК на его основе оказали на сырую и сухую массу стебля микроклонов картофеля (табл. 2).

Для культуры *in vitro* одним из важнейших показателей является формирование здоровой корневой системы. Внесение в МС-среду НК оказывает ингибирующий эффект на развитие корневой системы (рис. 1).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на снижение концентрации, исследуемые НК хитозан-Аг оказывают сильное токсическое действие на микропобеги картофеля, культивируемые непосредственно на модифицированных МС-средах.

Т а б л и ц а 2. Влияние нанокмпозитов хитозан-Ag на сырую и сухую массы стебля микроклонов картофеля в культуре *in vitro*

T a b l e 2. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on the wet and dry stem weight of microclone potato plants in *in vitro* culture

Вариант	Масса стебля			
	сырая, мг	снижение, %	сухая, мг	снижение, %
Разведение 1:500				
Контроль	55,07 ± 4,62 ^a	–	8,11 ± 0,68 ^a	–
Контроль 2	39,20 ± 0,40 ^b	28,8	6,09 ± 0,06 ^b	24,9
Вариант №1	41,40 ± 1,51 ^b	24,8	6,61 ± 0,24 ^b	18,5
Вариант №2	34,13 ± 2,25 ^c	38,0	5,15 ± 0,34 ^c	36,5
Разведение 1:1000				
Контроль	55,07 ± 4,62 ^a	–	8,11 ± 0,68 ^a	–
Контроль 3	47,87 ± 1,22 ^b	13,1	6,77 ± 0,17 ^b	16,5
Вариант № 4	25,27 ± 1,53 ^c	54,1	5,06 ± 0,31 ^c	37,5
Вариант № 5	30,67 ± 0,61 ^d	44,3	4,40 ± 0,09 ^c	45,7

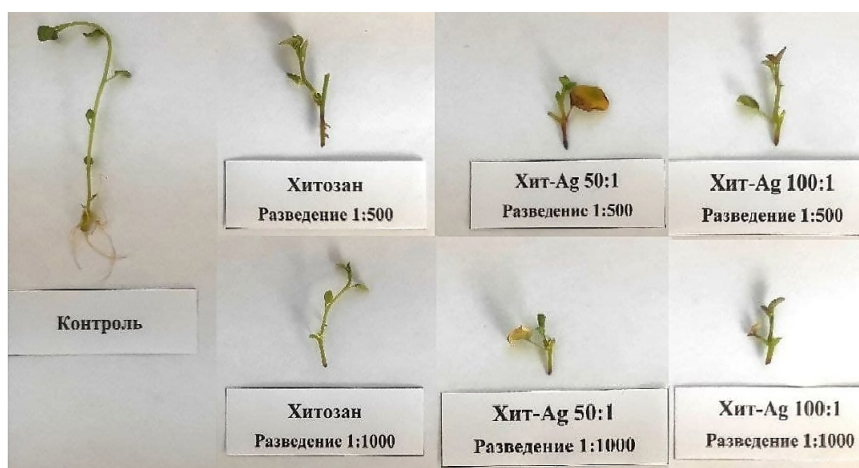


Рис. 1. Внешний вид микроклонов картофеля сорта Бриз после 4 недель культивирования на модифицированных хитозаном и нанокмпозитами на его основе питательных МС-средах

Fig. 1. Appearance of microclone potato plants after 4-week cultivation on MS-media modified with chitosan and silver-containing chitosan-based nanocomposites

Этап 2. МС-среда с добавлением НК Хит-Ag 50:1 и Хит-Ag 100:1 в разведении 1:500.

Для пересадки на жидкую МС-среду с НК отбирали микроклоны с одинаковой длиной стебля. Добавление НК Хит-Ag 50:1 в МС-среду привело к снижению как длины стебля (рис. 2, А), так и относительной скорости роста (рис. 2, В) опытных растений картофеля по сравнению с контролем.

Входящие в состав МС-среды НК Хит-Ag 50:1 и Хит-Ag 100:1 оказали положительный эффект на изменение массы стебля микроклонов картофеля. Сырая масса стебля микроклонов картофеля увеличилась на 22,3 и 32,7 % по сравнению с контролем (табл. 3). Под влиянием НК Хит-Ag 50:1 содержание сухой биомассы снизилось, в то время как НК Хит-Ag 100:1 усилили накопление сухой биомассы по сравнению с контролем (табл. 3).

Добавление НК на основе хитозана снизило количество междоузлий опытных вариантов по сравнению с контролем, но не по сравнению с чистым хитозаном в варианте Хит-Ag 50:1 (рис. 3, А).

Основными показателями ризогенеза у растений в культуре *in vitro* являются количество и длина корней [23]. Среднее число корней увеличилось на 24,5 % по сравнению с контролем при добавлении в МС-среду НК Хит-Ag 100:1 (рис. 3, В). При добавлении в МС-среду НК Хит-Ag 50:1 среднее число корней не изменилось по сравнению с контролем, но уменьшилось на 30,1 % по сравнению с таковым при внесении хитозана (рис. 3, В).

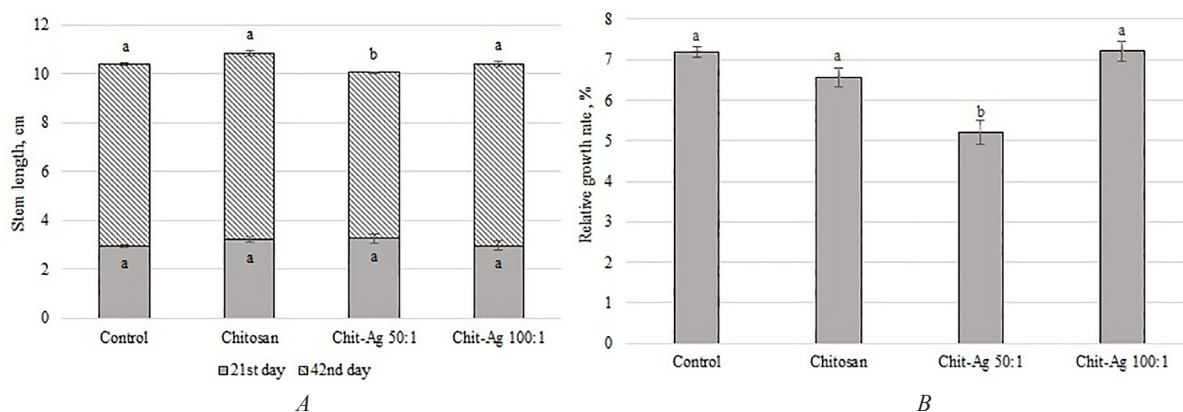


Рис. 2. Влияние нанокompозитов на основе серебросодержащего хитозана на длину стебля (A) и относительную скорость роста (B) микроклонов картофеля в культуре *in vitro*

Fig. 2. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on stem (A) and relative growth (B) of microclone potato plants in *in vitro* culture

Т а б л и ц а 3. Влияние нанокompозитов на основе серебросодержащего хитозана на сырую и сухую массу стебля микроклонов картофеля в культуре *in vitro*

Table 3. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on the wet and dry stem weight of microclone potato plants in *in vitro* culture

Вариант	Масса, мг	% к контролю	% к хитозану
Сырая масса стебля			
Контроль	133,67 ± 7,12 ^a	—	74,8
Хитозан	178,68 ± 6,06 ^b	133,7	—
Хит-Аг 50:1	163,52 ± 5,44 ^c	122,3	91,5
Хит-Аг 100:1	177,42 ± 3,21 ^b	132,7	99,3
Сухая масса стебля			
Контроль	14,12 ± 0,75 ^a	—	80,2
Хитозан	17,59 ± 0,60 ^b	124,6	—
Хит-Аг 50:1	12,35 ± 0,41 ^c	87,5	70,2
Хит-Аг 100:1	16,44 ± 0,30 ^d	116,4	93,4

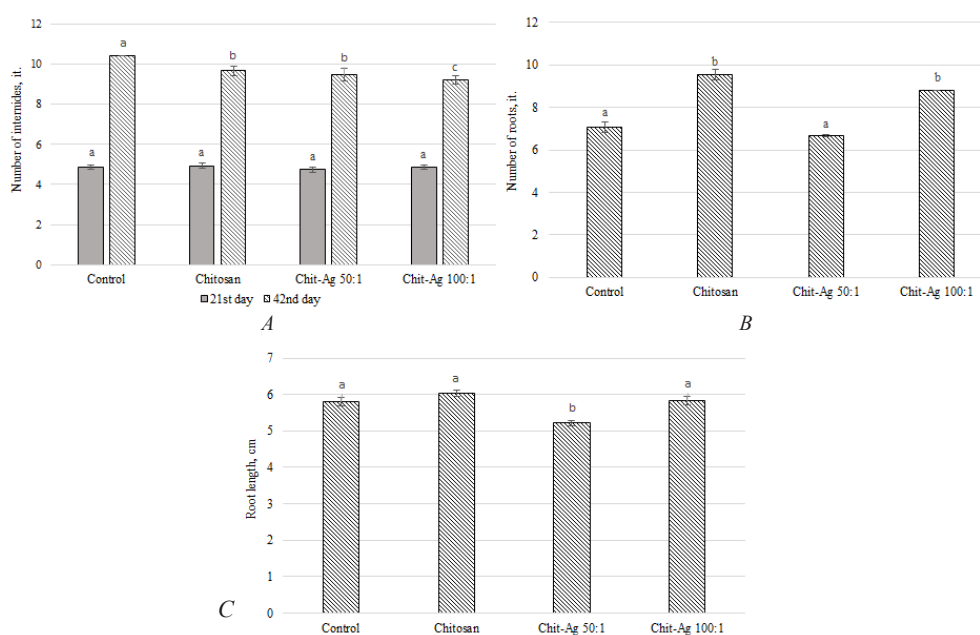


Рис. 3. Влияние нанокompозитов на основе серебросодержащего хитозана на число междоузлий (A), число корней (B) и длину корней (C) микроклонов картофеля в культуре *in vitro*

Fig. 3. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on the number of internodes (A), roots (B) and root length (C) of microclone potato plants in *in vitro* culture

Средняя длина корней снизилась на 10,3 % по сравнению с контролем и на 13,6 % при внесении хитозана у микроклонов картофеля, культивированных на МС-среде с добавлением НК Хит-Аг 50:1 (рис. 3, С).

Сырая масса корней увеличилась в опытных вариантах по сравнению с контролем и достоверно снизилась при добавлении хитозана (табл. 4). Внесенные в МС-среду НК на основе серебросодержащего хитозана не оказали достоверного воздействия на накопление сухого вещества в микроклонах картофеля по сравнению с контролем, однако достоверно снизили данный показатель на 35,6 и 41,9 % по сравнению с таковым при внесении хитозана (табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Влияние нанокомпозитов на основе серебросодержащего хитозана на сырую и сухую массу корней микроклонов картофеля в культуре *in vitro*

T a b l e 4. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on the wet and dry root weight of microclone potato plants in *in vitro* culture

Вариант	Масса, мг	% к контролю	% к хитозану
Сырая масса корней			
Контроль	41,71 ± 0,60 ^a	–	51,1
Хитозан	81,59 ± 1,32 ^b	195,6	–
Хит-Аг 50:1	58,97 ± 5,25 ^c	141,4	72,3
Хит-Аг 100:1	50,13 ± 2,88 ^d	120,2	61,4
Сухая масса корней			
Контроль	4,81 ± 0,07 ^a	–	63,4
Хитозан	7,59 ± 0,12 ^b	157,8	–
Хит-Аг 50:1	4,89 ± 0,44 ^a	101,7	64,4
Хит-Аг 100:1	4,42 ± 0,25 ^a	91,7	58,1

Уровень содержания ФС пигментов характеризует степень сформированности фотосинтетического аппарата растений. Анализ накопления основных ФС пигментов микроклонов картофеля показал, что внесенные НК на основе серебросодержащего хитозана в выбранных концентрациях не оказывают влияния на содержание Хл *a*, Хл *b* и каротиноидов в опытных растениях как по сравнению с контролем, так и при внесении хитозана. Только при добавлении в МС-среду НК Хит-Аг 100:1 достоверно снижалось содержание Хл *a* (на 50,1 % по сравнению с контролем и на 36,7 % при внесении хитозана) (рис. 4).

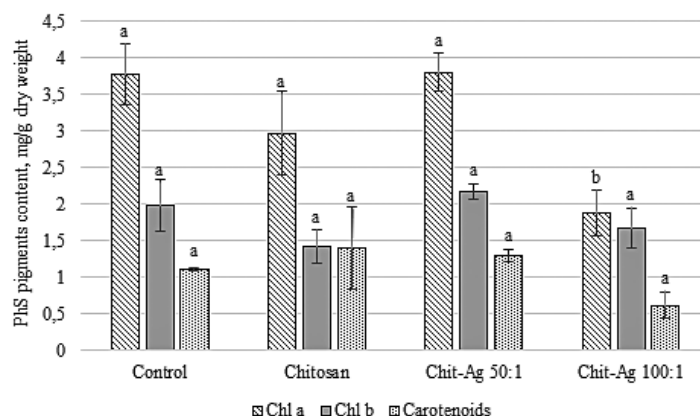


Рис. 4. Влияние нанокомпозитов на основе серебросодержащего хитозана на накопление основных фотосинтетических пигментов в микроклонах картофеля в культуре *in vitro*

Fig. 4. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on the basic photosynthetic pigment content of microclone potato plants in *in vitro* culture

Содержание перекиси водорода снижалось в опытных растениях на 23,7 и 41,8 % по сравнению с контролем, а при действии НК Хит-Аг 100:1 содержание перекиси водорода уменьшилось в микроклонах картофеля на 23,4 % по сравнению с таковым при внесении хитозана. Отсутствовали достоверные различия между воздействием Хит-Аг 50:1 и хитозана (рис. 5, А).

Внесение НК Хит-Аг 50:1 в МС-среду не влияло на содержание пролина по сравнению с контролем. В растениях, культивировавшихся на среде с добавлением Хит-Аг 100:1, уровень пролина был в 1,2 раза ниже, чем при добавлении хитозана (рис. 5, *B*).

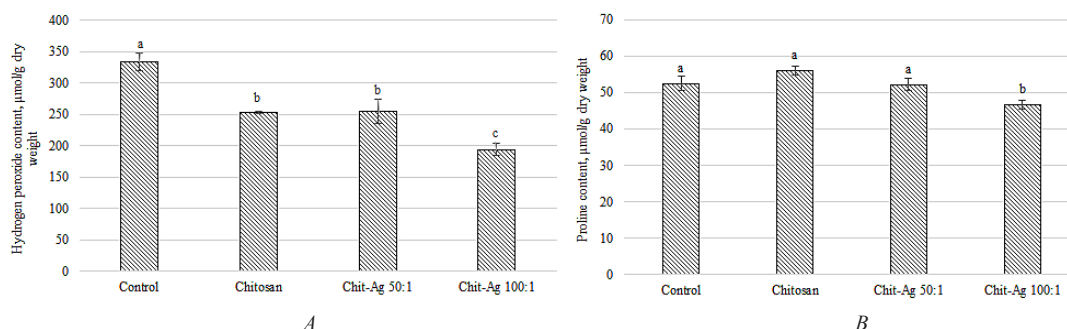


Рис. 5. Влияние нанокмпозитов на основе серебросодержащего хитозана на содержание перекиси водорода (*A*) и пролина (*B*) в микроклонах картофеля в культуре *in vitro*

Fig. 5. Influence of silver-containing chitosan-based nanocomposites on the content of hydrogen peroxide (*A*) and proline (*B*) of microclone potato plants in *in vitro* culture

Полученные нами результаты подтверждают зависимость эффекта НЧ серебра от степени сформированности микроклона. Так, при помещении свежеполученных микропобегов картофеля непосредственно на питательную среду, содержащую НК на основе серебросодержащего хитозана, выявлен сильный негативный эффект на ростовые процессы. Фитотоксическое действие исследуемых НК может быть связано с высвобождением ионов серебра Ag^+ , обладающих сильным токсичным эффектом.

Растения на ранних этапах развития более восприимчивы к действию НЧ. Так, показано, что внекорневая обработка саженцев огурца *Cucumis sativus* L. НЧ Ag оказала сильный отрицательный эффект на развитие. НЧ вызывали дегенерацию клеток коры корня и распад эндодермы [12]. У растений ряски *Spirodela polyrhiza* в ответ на обработку НЧ Ag снижалась общая биомасса и наблюдалось отмирание корней [24]. Присутствие в среде культивирования НЧ Ag в концентрации 0,3 мг/мл ингибировало удлинение корней и рост листьев растений *Arabidopsis thaliana* [25]. Добавление НЧ Ag в концентрациях 100 и 500 мг/л в раствор для гидропоники приводило к снижению биомассы цукини *Cucurbita pepo* [26].

Предпосевная обработка семян растворами НЧ Ag также имела негативный эффект на развитие растений, хоть и в меньшей степени, что может быть связано с защитной ролью семенных покровов. Инкрустация семян проса *Pennisetum glaucum* НЧ Ag в концентрации 2–6 мМ оказала ингибирующий эффект на удлинение корней и стебля, а также на накопление биомассы [13].

Однако при предпосевной обработке семян кресс-салата *Lepidium sativum* L. НЧ Ag, стабилизированные биополимером арабиногалактаном, в концентрации 2,34–9,38 мкг/мл достоверно увеличивали энергию прорастания, всхожесть, длину гипокотеля. Такой положительный эффект на ростовые процессы может быть связан с улучшенным поглощением воды и минеральных веществ за счет формирования многочисленных проводящих элементов корня [27]. В исследовании, проведенном на эксплантах картофеля *Solanum tuberosum*, показано, что модифицирование питательной среды НЧ Ag (5, 10, 15 и 20 мг/л) ингибирует удлинение побегов при усилении развития корневой системы [28]. Одной из причин отсутствия токсического эффекта НЧ Ag является достаточно медленное высвобождение ионов Ag^+ из их структуры, что позволяет развивающемуся растению адаптироваться к условиям среды. К тому же НЧ Ag могут участвовать в активации синтеза ауксинов в меристематических тканях, стимулируя ростовые процессы [29].

В нашем исследовании при использовании 3-недельных микроклонов с развитой корневой системой НК Хит-Аг 50:1 стимулировали накопление биомассы, замедляя при этом дальнейший рост стебля.

Количественное содержание и качественный состав пигментов, изменение их соотношения в листьях – это важные и чувствительные показатели физиологического состояния растений

и их фотосинтетического аппарата, направленности адаптивных реакций при воздействии стрессовых условий. Анализ содержания основных ФС пигментов микроклонов картофеля после 3 недель культивирования на питательной среде с добавлением НК показал отсутствие достоверных изменений. Только НК Хит-Аг 100:1 снижал содержание Хл а, что может свидетельствовать о возможной перестройке ФС аппарата.

Согласно литературным данным, НЧ стимулируют выработку АФК и значительно усиливают образование малонового диальдегида и перекиси водорода, что запускает синтез низкомолекулярных антиоксидантов – пролина и фенольных соединений [12, 13]. Однако в нашем исследовании уровень пролина в растениях при замене питательной среды на модифицированную стабилизированными хитозаном НЧ Аг был на уровне или ниже контрольных значений, а низкий уровень содержания перекиси водорода может свидетельствовать об отсутствии стрессового воздействия выбранной концентрации нанокompозитной смеси. Обнаруженный нами эффект может быть связан со структурой НК: неорганическое ядро Ag^0 , стабилизированное полимерной оболочкой полисахарида хитозана (core-shell-структура), может обеспечивать снижение токсичности НЧ Аг для микроклонов картофеля. Увеличение массового содержания хитозана в составе НК способствует снижению токсического эффекта за счет формирования плотной стабилизирующей ядро оболочки, замедляющей процесс образования ионов серебра Ag^+ .

Вывод. НК на основе серебросодержащего хитозана в разведениях 1:500 и 1:1000 оказывают тормозящий эффект на рост и развитие микроклонов, культивируемых непосредственно на модифицированных питательных средах: уменьшаются длина стебля, число междоузлий, накопление биомассы. Сильный отрицательный эффект исследуемые НК оказывают на развитие корневой системы микропобегов. Ингибирующее воздействие НК на основе серебросодержащего хитозана может быть связано с токсичным действием НЧ серебра, способных проникать в клетку, служить источником ионов серебра Ag^+ и вызывать окислительный стресс.

При изменении условий проведения эксперимента и использовании микроклонов с развитой корневой системой НК Хит-Аг 50:1 и Хит-Аг 100:1 в разведении 1:500 оказали положительный эффект на накопление биомассы, при этом Хит-Аг 50:1 замедлял дальнейший рост стебля и корневой системы. Результаты анализа накопления ФС пигментов, содержания перекиси водорода и пролина свидетельствуют об отсутствии стрессового воздействия у исследуемых серебросодержащих НК. Микроклоны с развитой корневой системой менее восприимчивы к действию НК Хит-Аг и способны к дальнейшему развитию.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ, грант Б21В-002.

Acknowledgements. This work was supported in part by the BRFFR, grant B21V-002.

Список использованных источников

1. Камская, В. Е. Хитозан: структура, свойства и использование / В. Е. Камская // Науч. обозрение. Биол. науки. – 2016. – № 6. – С. 36–42.
2. Тютюрев, С. Л. Экологически безопасные индукторы устойчивости растений к болезням и физиологическим стрессам / С. Л. Тютюрев // Вестн. защиты растений. – 2015. – № 1 (83). – С. 3–13.
3. Evaluation of quaternary ammonium chitosan derivatives differing in the length of alkyl side-chain: Synthesis and antifungal activity / L. Wei [et al.] // Int. J. Biol. Macromol. – 2019. – Vol. 129. – P. 1127–1132. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.099>
4. Хитин/хитозан и его производные: фундаментальные и прикладные аспекты / В. П. Варламов [и др.] // Успехи биол. химии. – 2020. – Т. 60. – С. 317–368.
5. Павлова, Н. А. Биологическая эффективность некоторых индукторов болезнеустойчивости в системе оздоровления и защиты картофеля от болезней в оригинальном семеноводстве / Н. А. Павлова // Вестн. защиты растений. – 2015. – № 3 (85). – С. 21–26.
6. Васюкова, Н. И. Индуцированная устойчивость растений и салициловая кислота / Н. И. Васюкова, О. Л. Озерцовская // Прикладная биохимия и микробиология. – 2007. – Т. 43, № 4. – С. 405–411.
7. Баданова, Е. Г. Препараты на основе хитозана для сельского хозяйства / Е. Г. Баданова, И. М. Давлетбаев, А. С. Сироткин // Вестн. технол. ун-та. – 2016. – Т. 19, № 16. – С. 89–95.
8. Chitosan as a growth stimulator in orchid tissue culture / K. L. Nge [et al.] // Plant Sci. – 2006. – Vol. 170, N 6. – P. 1185–1190. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.02.006>
9. Asghari-Zakaria, R. Effect of *in vitro* chitosan application on growth and minituber yield of *Solanum tuberosum* L. // R. Asghari-Zakaria, B. Maleki-Zanjani, E. Sedghi // Plant Soil Environment. – 2009. – Vol. 55, N 6. – P. 252–256. <https://doi.org/10.17221/1018-pse>

10. Chitosan in plant protection / A. El Hadrami [et al.] // *Marine Drugs*. – 2010. – Vol. 8, N 4. – P. 968–987. <https://doi.org/10.3390/md8040968>
11. Chirkov, S. N. The antiviral activity of chitosan (review) / S. N. Chirkov // *Appl. Biochem. Microbiol.* – 2002. – Vol. 38, N 1. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1023/A:1013206517442>
12. Differential phytotoxic responses of silver nitrate (AgNO₃) and silver nanoparticles (AgNPs) in *Cucumis sativus* L. / A. Tripathi [et al.] // *Plant Gene*. – 2017. – Vol. 11, Pt. B. – P. 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2017.07.005>
13. Physiological and biochemical responses of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) seedlings exposed to silver nitrate (AgNO₃) and silver nanoparticles (AgNPs) / I. Khan [et al.] // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2019. – Vol. 16, N 13. – Art. 2261. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132261>
14. Role of nanoparticles in plants / M. H. Siddiqui [et al.] // *Nanotechnology and Plant Sciences* / eds. : M. Siddiqui, M. Al-Whaibi, F. Mohammad. – Cham, 2015. – P. 19–35.
15. Препарат «Зерокс» на основе химически модифицированного высокодисперсного серебра как элемент эффективной борьбы с бактериальными и грибными эпифитотиями сельскохозяйственно значимых растений / П. М. Жеребин [и др.] // *Защита картофеля*. – 2014. – № 2. – С. 43–45.
16. Дыкман, Л. А. Взаимодействие растений с наночастицами благородных металлов / Л. А. Дыкман, С. Ю. Щёголев // *Сельскохозяйств. биология*. – 2017. – Т. 52, № 1. – С. 13–24.
17. Murashige, T. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures / T. Murashige, F. Skoog // *Physiologia Plantarum*. – 1962. – Vol. 15, N 3. – P. 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
18. Шлык, А. А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев / А. А. Шлык // *Биохимические методы в физиологии растений* : сб. ст. / отв. ред. О. А. Павлинова. – М., 1971. – С. 154–170.
19. Extracellular H₂O₂ induced by Oligagalacturonides is not involved in the inhibition of the auxin-regulated *rolB* gene expression in tobacco leaf explants / D. Bellincampi [et al.] // *Plant Physiol.* – 2000. – Vol. 122, N 4. – P. 1379–1385. <https://doi.org/10.1104/pp.122.4.1379>
20. Bates, L. S. Rapid determination of free proline for water-stress studies / L. S. Bates, R. P. Waldren, J. D. Teare // *Plant Soil*. – 1973. – Vol. 39, N 1. – P. 205–207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
21. Макеева, И. Ю. Физиолого-биохимические ответы *Solanum tuberosum* на действие кофейной кислоты : дис. ... канд. биол. наук : 03.01.05 / И. Ю. Макеева. – Орел, 2017. – 122 л.
22. Влияние нанокомпозитов на основе серебросодержащего хитозана на развитие микроклонов растений картофеля / Н. А. Еловская [и др.] // *Проблемы оценки, мониторинга и сохранения биоразнообразия* : сб. материалов IV Респ. науч.-практ. экол. конф., Брест, 25 нояб. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина ; редкол. : Н. М. Матусевич, Н. В. Шкуратова, М. В. Левковская. – Брест, 2021. – С. 121–125.
23. Эрастова, М. А. Изучение процесса ризогенеза растений картофеля *in vitro* / М. А. Эрастова, Ю. Н. Федорова // *Вестн. Алтайск. гос. аграр. ун-та*. – 2009. – № 5 (55). – С. 21–23.
24. Physiological analysis of silver nanoparticles and AgNO₃ toxicity to *Spirodela polyrrhiza* / H. Sh. Jiang [et al.] // *Environ. Toxicol. Chem.* – 2012. – Vol. 31, N 8. – P. 1880–1886. <https://doi.org/10.1002/etc.1899>
25. Engineered silver nanoparticles are sensed at the plasma membrane and dramatically modify the physiology of *Arabidopsis thaliana* plants / A. Sosan [et al.] // *Plant J.* – 2016. – Vol. 85, N 2. – P. 245–257. <https://doi.org/10.1111/tbj.13105>
26. Stampoulis, D. Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants / D. Stampoulis, S. K. Sinha, J. C. White // *Environ. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. 43, N 24. – P. 9473–9479. <https://doi.org/10.1021/es901695c>
27. О биологической активности стабилизированных арабиногалактаном наночастиц серебра в отношении кресс-салата *Lepidium sativum* L. Curled и фитопатогенного микромицета *Fusarium sambucinum* / О. И. Гудкова [и др.] // *Сельскохозяйств. биология*. – 2021. – Т. 56, № 3. – С. 500–510.
28. Бугара, И. А. Особенности влияния композиций наносеребра на процессы морфогенеза в культуре картофеля *in vitro* / И. А. Бугара, С. Н. Жалдак, Р. В. Трускавецкий // *Sci. Time*. – 2015. – № 11 (23). – С. 87–91.
29. Almutairi, Z. M. Effect of silver nanoparticles on seed germination of crop plants / Z. M. Almutairi, A. A. Alharbi // *J. Adv. Agricult.* – 2015. – Vol. 4, N 1. – P. 280–285. <https://doi.org/10.24297/jaa.v4i1.4295>

References

1. Kamskaya V. E. *Chitosan: structure, properties and using*. *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki* [Scientific review. Biological sciences], 2016, no. 6, pp. 36–42 (in Russian).
2. Tyuterev S. L. Ecologically safe inducers of plant resistance to diseases and physiological stresses. *Vestnik zashchity rastenii = Plant protection news*, 2015, no. 1 (83), pp. 3–13 (in Russian).
3. Wei L., Mi Y., Zhang J., Li Q., Dong F., Guo Z. Evaluation of quaternary ammonium chitosan derivatives differing in the length of alkyl side-chain: Synthesis and antifungal activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 129, pp. 1127–1132. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.099>
4. Varlamov V. P., Il'ina A. V., Shagdarova B. C., Lun'kov A. P., Mysyakina I. S. Chitin/chitosan and its derivatives: fundamental and applied aspects. *Uspekhi biologicheskoi khimii* [Advances in biological chemistry], 2020, vol. 60, pp. 317–368 (in Russian).
5. Pavlova N. A. Biological efficiency of some disease resistance inducers in the system of rehabilitation and protection of potato against diseases in original seedage. *Vestnik zashchity rastenii = Plant protection news*, 2015, no. 3 (85), pp. 21–26 (in Russian).
6. Vasyukova N. I., Ozeretskovskaya O. L. Induced plant resistance and salicylic acid: a review. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied biochemistry and microbiology], 2007, vol. 43, no. 4, pp. 405–411 (in Russian).

7. Badanova E. G., Davletbaev I. M., Sirotkin A. S. Preparations based on chitosan for agriculture. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2016, vol. 19, no. 16, pp. 89–95 (in Russian).
8. Nge K. L., Nwe N., Chandkrachang S., Stevens W. F. Chitosan as a growth stimulator in orchid tissue culture. *Plant Science*, 2006, vol. 170, no. 6, pp. 1185–1190. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.02.006>
9. Asghari-Zakaria R., Maleki-Zanjani B., Sedghi E. Effect of *in vitro* chitosan application on growth and minituber yield of *Solanum tuberosum* L. *Plant Soil and Environment*, 2009, vol. 55, no. 6, pp. 252–256. <https://doi.org/10.17221/1018-pse>
10. El Hadrami A., Adam L. R., El Hadrami I., Daayf F. Chitosan in plant protection. *Marine Drugs*, 2010, vol. 8, no. 4, pp. 968–987. <https://doi.org/10.3390/md8040968>
11. Chirkov S. N. The antiviral activity of chitosan. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2002, vol. 38, no. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1023/A:1013206517442>
12. Tripathi A., Liu S., Singh P. K., Kumar N., Pandey A. Ch., Tripathi D. K., Chauhan D. K., Sahi Sh. Differential phytotoxic responses of silver nitrate (AgNO₃) and silver nanoparticles (AgNPs) in *Cucumis sativus* L. *Plant Gene*, 2017, vol. 11, pt. B, pp. 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2017.07.005>
13. Khan I., Raza M. A., Bin Khalid M. H., Awan S. A., Raja N. I., Zhang X., Min S., Wu B. Ch., Hassan M. J., Huang L. Physiological and biochemical responses of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) seedlings exposed to silver nitrate (AgNO₃) and silver nanoparticles (AgNPs). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, no. 13, art. 2261. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132261>
14. Siddiqui M. H., Al-Wahaibi M. H., Firoz M., Al-Khaishany M. Y. Role of nanoparticles in plants. *Nanotechnology in Plant Science*. Cham, 2015, pp. 19–35.
15. Zherebin P. M., Ignatov A. N., Elanskii S. N., Pobedinskaya M. A., Lisichkin G. V., Denisov A. N., Krutyakov Yu. A. “Zeroks”-silver-based preparate for an effective control of bacterial and fungal epidemic diseases of agricultural plants. *Zashchita kartofelya* [Potato protection], 2014, no. 2, pp. 43–45 (in Russian).
16. Dykman L. A., Shchegolev S. Yu. *Interactions of plants with noble metal nanoparticles (review)*. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya* [Agricultural biology], 2017, vol. 52, no. 1, pp. 13–24 (in Russian).
17. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 1962, vol. 15, no. 3, pp. 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
18. Shlyk A. A. Determination of chlorophylls and carotenoids in green leaf extracts. *Biochemical methods in plant physiology: collection of articles*. Moscow, 1971, pp. 154–170 (in Russian).
19. Bellincampi D., Dipierro N., Salvi G., Cervone F., De Lorenzo G. Extracellular H₂O₂ induced by Oligagalacturonides is not involved in the inhibition of the auxin-regulated *roIB* gene expression in tobacco leaf explants. *Plant Physiology*, 2000, vol. 122, no. 4, pp. 1379–1385. <https://doi.org/10.1104/pp.122.4.1379>
20. Bates L. S., Waldren R. P., Teare J. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 1973, vol. 39, no. 1, pp. 205–207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
21. Makeeva I. Yu. *Physiological and biochemical responses of Solanum tuberosum to the action of caffeic acid*. Ph. D. diss. Orel, 2017. 122 p. (in Russian).
22. Elovskaya N. A., Kalatskaya Zh. N., Nedved' E. L., Gilevskaya K. S. The influence of silver-containing chitosan-based nanoparticles on the development of potato microclones. *Problemy otsenki, monitoringa i sokhraneniya bioraznoobraziya: sbornik materialov IV Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi ekologicheskoi konferentsii (Brest, 25 noyabrya 2021)* [Problems of assessment, monitoring and conservation of biodiversity: collection of materials of the IV Republican scientific and practical ecological conference (Brest, November 25, 2021)]. Brest, 2021, pp. 121–125 (in Russian).
23. Erastova M. A., Fedorova Yu. N. Study of rhizogenesis of potato mini-plants *in vitro*. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2009, no. 5 (55), pp. 21–23 (in Russian).
24. Jiang H. Sh., Li M., Chang F. Y., Li W., Yin L. Y. Physiological analysis of silver nanoparticles and AgNO₃ toxicity to *Spirodela polyrhiza*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, vol. 31, no. 8, pp. 1880–1886. <https://doi.org/10.1002/etc.1899>
25. Sosan A., Svistunenko D., Straltsova D., Tsiurkina K., Anderson D., Sokolik A., Colbeck I., Demidchik V. Engineered silver nanoparticles are sensed at the plasma membrane and dramatically modify the physiology of *Arabidopsis thaliana* plants. *Plant Journal*, 2016, vol. 85, no. 2, pp. 245–257. <https://doi.org/10.1111/tpj.13105>
26. Stampoulis D., Sinha S. K., White J. C. Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environmental Science and Technology*, 2009, vol. 43, no. 24, pp. 9473–9479. <https://doi.org/10.1021/es901695c>
27. Gudkova O. I., Bobkova N. V., Fel'dman N. B., Lufarov A. N., Gromovych T. I., Samylina I. A., Ananyan M. A., Lutsenko S. V. Study of the biological activity of arabinogalactan-stabilized silver nanoparticles towards watercress *Lepidium sativum* L. Curled and plant pathogenic micromycete *Fusarium sambucinum*. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya* [Agricultural biology], 2021, vol. 56, no. 3, pp. 500–510 (in Russian).
28. Bugara I. A., Zhaldak S. N., Truskavetskii R. V. Features of the influence of nanosilver compositions on the processes of morphogenesis in potato culture *in vitro*. *Science Time*, 2015, no. 11 (23), pp. 87–91 (in Russian).
29. Almutairi Z. M., Alharbi A. A. Effect of silver nanoparticles on seed germination of crop plants. *Journal of Advances in Agriculture*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 280–285. <https://doi.org/10.24297/jaa.v4i1.4295>

Информация об авторах

Еловская Нинель Анатольевна – аспирант. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: yalousskaya92@mail.ru

Калацкая Жанна Николаевна – канд. биол. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kalatskayaj@mail.ru

Ламан Николай Афанасьевич – академик, д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikolai.laman@gmail.com

Гилевская Ксения Сергеевна – канд. хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 2200141, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: k_hilevskay@mail.ru

Красковский Александр Николаевич – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 2200141, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: aleks.kraskovsky@gmail.com

Куликовская Виктория Игоревна – канд. хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 2200141, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulikousskaya@gmail.com

Information about the authors

Ninel A. Yalousskaya – Postgraduate student. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yalousskaya92@mail.ru

Joanna N. Kalatskaja – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Leading Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kalatskayaj@mail.ru

Nikolai A. Laman – Academician, D. Sc. (Biol.), Professor, Head of the Laboratory. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolai.laman@gmail.com

Kseniya S. Hilevskaya – Ph. D. (Chem.), Associate Professor, Leading Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: k_hilevskay@mail.ru

Aliaksandr N. Kraskouski – Ph. D. (Chem.), Senior Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aleks.kraskovsky@gmail.com

Viktoryia I. Kulikousskaya – Ph. D. (Chem.), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulikousskaya@gmail.com