УДК 633.491:577.17 DOI: 10.33284/2658-3135-102-4-33

Воздействие ультрадисперсных частиц диоксида кремния на биохимические показатели растений *Solánum tuberósum*

Е.В. Аминова[1], А.А. Мушинский[1], А.М. Короткова[1,2], Т.Т. Дергилёва[3]
[1]Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (г. Оренбург)
[2]Оренбургский государственный университет (г. Оренбург)
[3]Южно-Уральский научно-исследовательский институт садоводства и картофелеводства-филиал ФГБНУ УрФАНИЦ УрОРАН (г. Челябинск)

Аннотация. Целью исследования послужила оценка влияния ультрадисперсных частиц SiO_2 на биохимические показатели растений *Solánum tuberósum.* Тестирование биологической активности наноформы SiO_2 на клубнях картофеля проводилось на примере пяти возрастающих концентраций кремния (0,03; 0,09; 0,18; 0,21 и 0,36 г/кг картофеля) и контроля (без обработки ультрадисперсными частицами). Анализ содержания хлорофиллов в ростках *Solánum tuberósum* показал, что при концентрациях наноформы SiO_2 0,03…0,21 г/кг (по кремнию) содержание хлорофилла *а* было выше контроля на 9,0-48,8 % ($P \leq 0,05$), а содержание каротиноидов – на 29,7 %. В вегетационном эксперименте выявлено, что применение более высоких концентраций ультрадисперсных частиц SiO_2 (0,21 и 0,36 г/кг по кремнию) обеспечило максимальное накопление кремния в ростках (4,79…4,87 мкг/г), корнях (3,54…3,59 мкг/г) и клубнях (3,87…3,95 мкг/г). При этом в полевом опыте накопление кремния в стеблях и листьях превышало контроль по всем концентрациям препарата соответственно на 7,70-30,1 % и на 5,0-39,1 % ($P \leq 0,05$). В результате исследований выявлено снижение содержания белка в клубнях картофеля после воздействия наноформы SiO_2 во всех вариантах опыта.
Ключевые слова: картофель, клубни, диоксид кремния, ультрадисперсные частицы, фотосинтетические пигменты, протеин.

UDC 633.491:577.17

Exposure of ultrafine silica particles on biochemical indicators of plants Solánum tuberósum

Evgenia V Aminova [1], Alexander A Mushinsky [1], Anastasia M Korotkova [1, 2], Tamara T Dergileva[3]
[1]Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences (Orenburg, Russia)
[2]Orenburg State University (Orenburg, Russia)
[3]South-Ural Research Institute of Horticulture and Potato-growing-Branch of Ural Federal Agrarian Research and Development Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Agrarian Sciences (Chelyabinsk, Russia)

Summary. The aim of the study was to assess the effect of ultrafine particles of SiO_2 on biochemical parameters of *Solánum tuberósum* plants. The biological activity of SiO_2 nanoform on potato tubers was tested using five increasing concentrations of silicon (0.03; 0.09; 0.18; 0.21 and 0.36 g/kg potato) and control (without treatment with ultrafine particles). An analysis of the chlorophyll content in *Solánum tuberósum* sprouts showed that, at SiO_2 nanoform concentrations of 0.03...0.21 g/kg (according to silicon), the chlorophyll a content was 9.0-48.8% higher than the control ($P \leq 0.05$) and the content of carotenoids – by 29.7%. In a growing experiment, it was found that the use of higher concentrations of ultrafine particles of SiO^2 (0.21 and 0.36 g / kg for silicon) ensured the maximum accumulation of silicon in sprouts (4.79...4.87 μg/g), roots (3,54...3.59 μg/g) and tubers (3.87...3.95 μg/g). Moreover, in the field experiment, the accumulation of silicon in the stems and leaves exceeded the control for all drug concentrations by 7.70-30.1% and 5.0-39.1%, respectively ($P \leq 0.05$). As a result of the studies, a decrease in the protein content in potato tubers after exposure to the SiO_2 nanoform in all experimental variants was revealed.
Key words: potato, tubers, silicon oxide, ultrafine silica particles, photosynthetic pigments, protein.

Введение.

В связи со стремительным развитием нанотехнологий стали особенно актуальными исследования по влиянию нанопродуктов и нанопрепаратов на состояние растений (Fraceto LF et al., 2016; Pošćić F et al., 2016; Wang F et al., 2016). Картофель занимает четвёртое место по объёму производства в мире (после риса, пшеницы и кукурузы) и считается стратегической культурой с точки зрения продовольственной безопасности (Haynes MJ et al., 2012; Zaman MS et al., 2015). Клубни картофеля являются конечным продуктом в сельском хозяйстве, которые развиваются в непосредственном контакте с почвой (Vulavala VKR et al., 2016).

Из литературных источников известно (Reynolds GH, 2002), что наноматериалы способствуют более быстрому прорастанию растений, улучшают их устойчивость к абиотическим и биотическим стрессам, повышают эффективность метаболизма питательных веществ и способствуют росту растений, одновременно оказывая меньшее воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными материалами в макроформе. Наноматериалы на основе кремния могут быть сконструированы таким образом, чтобы иммобилизовать питательные вещества в почве (Fraceto LF et al., 2016), доставлять ДНК, белки и другие биологически активные вещества в растения (Martin-Ortigosa S et al., 2014). В своих исследованиях Slomberg DL and Schoenfisch MH (2012) показали, что наночастицы SiO_2 в целом нетоксичны для растений. Также было показано, что вымачивание растений в нанокремнии в течение 6 часов способствует росту боковых корней, увеличению длины корня и содержания в листьях хлорофилла (Bao-shan L et al., 2004). Кроме того, применение нанокремния способствует увеличению площади листьев, повышению скорости фотосинтеза и устьичной проводимости (Crusciol CAC et al., 2009). Как отмечают Zhu H с соавторами (2008), соотношение хлорофилл *a*+*b*/каротиноиды стабильно реагирует на экстремальные факторы среды, т. е. концентрация фотосинтетических пигментов определяет активность фотосинтетического аппарата, скорость накопления ассимилянтов, что в результате отражается на продуктивности и росте растений.

Таким образом, литературные источники предоставляют достаточное число работ по чувствительности отдельных представителей сельскохозяйственных растений к нанокремнию (Nazaralian S et al., 2017; Asgari F et al., 2018), в то время как картофель, являющийся продуктом питания, богатым по питательным веществам (Chitchumroonchokchai C et al., 2017), исследован в этом плане недостаточно (Gowayed SWH et al., 2017).

Цель исследования.

Оценка влияния ультрадисперсных частиц диоксида кремния на биохимические показатели растений Solánum tuberósum.

Материалы и методы исследований.

Объект исследования. Клубни картофеля (Solanum tuberosum) сорта «Ицил».

Схема эксперимента. Семенной материал получен путём размножения на безвирусной основе (*in vitro*) и предоставлен для исследований Южно-Уральским научно-исследовательским институтом садоводства и картофелеводства-филиал ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (г. Челябинск, Россия).

В исследованиях использовали наночастицы диоксида кремния (далее – НЧ SiO_2) размером 30,7±0,3, потенциал – 27±0,12 мВ, полученные методом плазмохимического синтеза в ООО «Передовые порошковые технологии» (г. Томск, Россия).

Тестирование биологической активности НЧ SiO_2 на клубнях картофеля проводилось на примере пяти концентраций кремния в трёх повторностях. Перед началом эксперимента клубни картофеля дезинфицировали в 0,01 % растворе $KMnO_4$ в течение пяти минут, после подсушивали в течение 15-20 минут. Затем взвешивали каждый клубень (масса варьировала от 41,0 до 52,7 г) и выкладывали в пластиковые контейнеры на расстоянии 5-7 см друг от друга в количестве 10 штук. Отдельно готовили суспензии НЧ SiO_2 согласно ТУ 931800-4270760-96, для чего помещали точные

навески препарата в дистиллированную воду (до конечных концентраций 0,03; 0,09; 0,18; 0,21 и 0,36 г/кг по кремнию) и обрабатывали в ультразвуковом диспергаторе в течение 30 минут. Затем образцы клубней в каждом контейнере заливали 100 мл свежеприготовленных суспензий НЧ SiO_2, встряхивали контейнер в течение 5 минут и сливали суспензии. В качестве контроля использовали необработанные препаратом клубни (концентрация кремния 0 г/кг). После обработки клубни в контейнерах проращивали в климатической камере. Эксперимент проводился 28 дней.

Параллельно вегетационному опыту проводился и полевой опыт. Обработанные теми же концентрациями кремния клубни картофеля были упакованы в целлофановые пакеты и высажены в тот же день (16 мая) в открытый грунт в 4-кратной повторности по 10 клубней. Закладка опыта проводилась согласно методике полевого опыта Б.А. Доспехова (1985), методике исследований по культуре картофеля (1967). Площадь делянки составляла 70 м^2 (50 м×1,4 м).

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла *а* и *б*, каротиноидов) определяли в этанольном экстракте спектрофотометрическим методом по стандартной методике (Wintermans JFGM and Mots AD, 1965) с видоизменениями (Корнилина В.В., 2012; Смашевский Н.Д., 2011). Расчёты осуществляли по формулам Смита и Бенитеза (Wintermans JFGM and Mots AD, 1965):

Ca (мг/л)=13,70 ОП665-5,76 ОП649

Cb (мг/л)=25,80 ОП 649-7,60 ОП665

Ca+b (мг/л)=6,10 ОП 665+20,04 ОП 649

Скар. (мг/л)=4,69 ОП 440,5-0,268 С *a+b*

Определение содержания сырого протеина в клубнях картофеля проводили на 28-е сутки по методике Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-93). Для анализа брали по одному клубню в 3-кратной повторности.

Содержание кремния в различных частях растений (ростках, корнях, клубнях, стеблях, листьях) определяли на 7-е, 14-е и 45-е сутки методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре.

Оборудование и технические средства. Лабораторные исследования проводились в Испытательном центре ЦКП ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (аттестат аккредитации № RA.RU.21ПФ59 от 02.12.2015). Суспензии НЧ SiO_2 обрабатывали в ультразвуковом диспергаторе УЗДН, f-35 кГц, N-300 Вт (Россия). Клубни картофеля проращивали в климатической камере («Pol-Eko-AparaturaSp. J.», Польша). Учётные образцы взвешивали на весах лабораторных ВМ 510Д (ООО «ОКБ ВЕСТА», г. Санкт-Петербург, Россия). Содержание фотосинтетических пигментов определяли на спектрофотометре СФ-2000 (Россия). Содержание кремния в различных частях растений определяли на квадрупольном масс-спектрометре (Nexion 300D, PerkinElmer, США).

Статистическая обработка. Данные представлены как среднее (*M*) и стандартная ошибка среднего (*m*). Статистический анализ выполняли с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft Office», США) и с использованием методик ANOVA в программе «Statistics 10.0» («StatSoft Inc.», США). Различия считались статистически достоверными при $P \leq 0,05$.

Результаты исследования.

В вегетационном эксперименте анализ содержания хлорофиллов в ростках на 21-й день после обработки НЧ SiO_2 показал, что при концентрациях кремния 0,03…0,21 г/кг содержание хлорофилла *а* значительно превышало контрольный вариант (на 9,0-48,8 %, $P \leq 0,05$) (рис. 1). Совершенно другая ситуация сложилась при концентрации кремния 0,36 г/кг: снижение хлорофилла *а* составило 8,0 % ($P \leq 0,05$).

Также регистрировалось снижение содержания хлорофилла *b* при концентрациях кремния 0,03 и 0,36 г/кг – на 19,0 % (рис. 1).

При обработке клубней НЧ SiO_2 общее повышение содержания хлорофилла (*a+b)* по отношению к контролю варьировало от 2,6 до 57 % ($P \leq 0,05$).

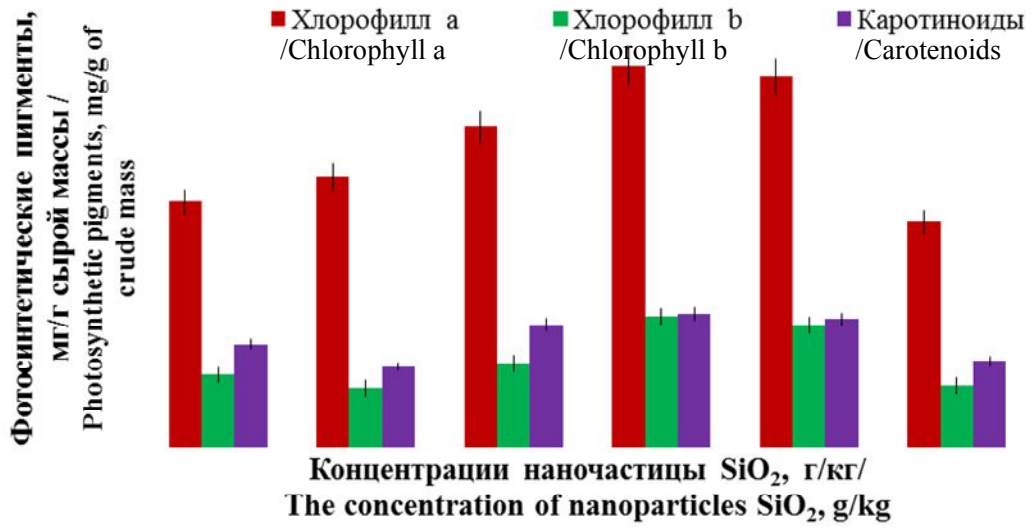

Рис. 1– Влияние НЧ SiO_2 на содержание фотосинтетических пигментов в ростках картофеля на 21 день, при P≤0,05
Figure 1 – Influence of SiO_2 NPs on content of photosynthetic pigments in potato sprouts for 21 days, P≤0.05

Наряду с хлорофиллом в состав пигмент-белковых комплексов входят и каротиноиды, т. е. они также являются обязательными компонентами фотосинтетического аппарата растений. Анализ их содержания в ростках *Solánum tuberósum* показал, что после обработки клубней НЧ SiO_2 с концентрациями кремния 0,09; 0,18 и 0,21 г/кг выявлено увеличение содержания каротиноидов по сравнению с контролем до 29,7 % (рис. 1).

Между тем, применение в вегетационном эксперименте более высоких концентраций кремния (0,21 и 0,36 г/кг) обеспечило его максимальное накопление в ростках (4,79…4,87 мкг/г), корнях (3,54… 3,59 мкг/г) и клубнях (3,87…3,95 мкг/г) (табл. 1).

Однако в полевом опыте накопление кремния в стеблях и листьях превышало контроль по всем вариантам обработки (концентрации кремния 0,3…0,36 г/кг) соответственно на 7,7-30,1 % и на 5,0-39,1 % (P≤0,05) (табл. 1).

Таблица 1. **Влияние различных концентраций НЧ SiO_2 на накопление Si в ростках, корнях, клубнях, стеблях и листьях картофеля**
Table1. **Influence of various concentrations of SiO_2 NP on the accumulation of Si in sprouts, roots, tubers, stems and leaves of potatoes**

Концентрации, г/кг / The concentration, g/kg	**Концентрация кремния в мкг/г/Silicon concentration in µg/g**				
	в ростках/ in sprouts	**в корнях/ in roots**	**в клубне/ in tuber**	**в стеблях/ in stems**	**в листьях / in leaves**
	14 сутки/ days	**14 сутки/ days**	**14 сутки/ days**	**45 сутки/ days**	**45 сутки/ days**
0	4,11±1,01	3,07± 1,8	3,41±1,01	5,84	4,01±0,29
0,03	4,18±1,21	3,24± 2,0*	3,41±1,50	6,29*	4,21±0,35*
0,09	4,30±1,22	3,35±1,4	3,34±1,42	6,41*	4,94±0,34*
0,18	4,76±1,60*	3,50±1,0	3,76±1,14*	7,48*	5,55±0,38*
0,21	4,79±1,0*	3,54 ± 2,0*	3,87±1,60*	7,45*	5,53±0,50*
0,36	4,87±1,03*	3,59± 1,8*	3,95±1,62*	7,60*	5,58±0,49*

Примечание: * – P≤0,05
Note: * – P≤0.05

Известно, что клетка, наряду с углеводами, использует и белковые соединения в качестве субстрата для дыхания. Особенно интенсивное дыхание происходит в период прорастания клубней, в которых в качестве запасного питательного вещества содержатся белки. В вегетационном эксперименте установлено, что на 28-й день после обработки суспензиями НЧ SiO_2 содержание белка в клубнях варьировало от 1,1 до 2,5 %. При этом наибольшее содержание белка оказалось в контроле (рис. 2).

Вероятно, обработанные НЧ SiO_2 клубни более интенсивно использовали белки в процессе дыхания, т. к. увеличение роста ростков и корней в конце испытания было более интенсивным в сравнении с контролем.

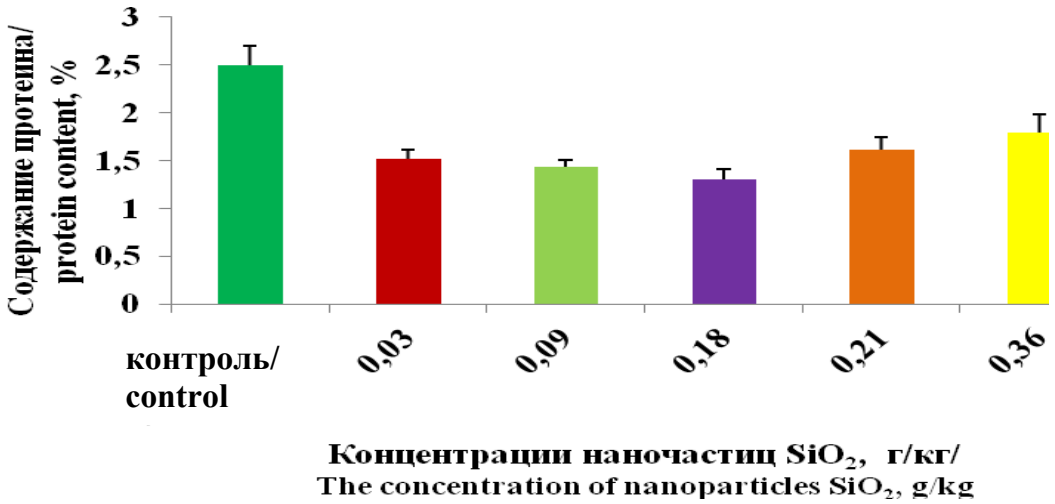

Рис. 2 – Содержание протеина в клубнях *Solánum tuberósum* после обработки НЧ SiO_2 на 28 сутки
Figure 2 – Protein content in tubers *Solánum tuberósum* after treatment with NP SiO_2 within 28 days

Обсуждение полученных результатов.

Результаты вегетационных и полевых исследований показали, что обработка клубней наночастицами диоксида кремния (НЧ SiO_2) в целом улучшает качественные показатели картофеля. Что касается анализа состояния фотосинтетической активности картофеля, то в нашем исследовании отмечалось повышение содержания хлорофиллов и каротиноидов (рис. 1). Как правило, существуют противоречивые данные в отношении влияния нанокремния на содержание хлорофилла: одни учёные говорят об увеличении содержания пигментов (Bao-shan L et al., 2004; Yuvakkumar R et al., 2011), другие, наоборот, об уменьшении содержания хлорофиллов (Wei C et al., 2010; Rad JS et al., 2014). Так, в работе Sun D с коллегами (2016) показано, что НЧ SiO_2 повышают скорость фотосинтеза в проростках люпина и пшеницы, не вызывая при этом изменений в активности антиоксидантных ферментов. Интересно отметить, что в этом же исследовании авторы наблюдали изменение молекулярной структуры хлорофилла в виде сдвига 14 $см^{-1}$ и 10 $см^{-1}$ в рамановских спектрах (Sun D et al., 2016).

В нашем случае исследуемые частицы диаметром 30 нм, скорее всего, не могли проникнуть через поры клеточных стенок (размер которых варьирует от 2 до 30 нм), а седиментировались на поверхности клеток (Judy JD et al., 2012), действуя опосредованно. Поскольку растения картофеля не могут накапливать большое количество кремния (Ma JF et al., 2001), а в нашем исследовании обработка клубней, напротив, способствовала увеличению накопления элемента (табл. 1), то мы предполагаем, что растения поглощали кремний исключительно в виде ионов Si^{4+}. Визуально обработанные нанокремнием клубни были покрыты своеобразной плёнкой (в отличие от интактных растений).

Так, применение НЧ SiO_2 в концентрациях (по кремнию) 0,21 и 0,36 г/кг в вегетационном опыте обеспечило максимальное содержание кремния во всех частях растений. В то же время в полевом эксперименте накопление кремния превышало контроль при всех вариантах обработки (табл. 1).

Полученные нами данные согласуются с работами других исследователей (Crusciol CAC et al., 2009; Pilon C et al., 2013) в том, что накопление кремния во всех частях растения картофеля было выше как при корневой, так и внекорневой подкормке кремнием (в сравнении с контролем). При этом различное содержание элемента в надземных и подземных органах растений можно объяснить разницей транспортёров кремния (Nazaralian S et al., 2017). Вполне вероятно, что НЧ SiO_2 выделяли ионы кремния, которые затем поглощались растениями непосредственно в виде Si^{4+} через каналы аквапоринового типа (с помощью Nod26-подобных белков) (Deshmukh RK et al., 2015).

В нашем исследовании зарегистрировано снижение содержания белка в клубнях картофеля после воздействия НЧ SiO_2 во всех вариантах опыта (рис. 2), что согласуется с результатами работы Crusciol CAC et al. (2009). Причиной такого снижения может быть распад белков для донации углерода для синтеза пролина (Stewart CR, 1981). Напротив, в других работах отмечалось повышение общего содержания протеина после обработки нанокремнием (Sun D et al., 2016; Nazaralian S et al., 2017).

Выводы.

Таким образом, используемые ультрадисперсные частицы диоксида кремния (НЧ SiO_2) в эксперименте способствовали значительному увеличению накопления кремния в различных частях растений.

Выявлено повышенное содержание фотосинтетических пигментов в ростках картофеля при обработке клубней суспензией препарата НЧ SiO_2 в концентрациях 0,09...0,21 г/кг (по кремнию).

Установлено снижение протеина в клубнях картофеля на 28-е сутки до 28,4…45,0 % по отношению к контролю.

Исследования проводились по Комплексным программам Уро РАН 2018-2020 гг. «Разработка теоретических основ практических приёмов повышения эффективности производства продукции растениеводства с использованием нанотехнологических решений» № 18-8-9-18

Литература

1. ГОСТ 13496.4-93. Корма, комбикорма, комбикормовое сырьё. Методы определения содержания азота и сырого протеина. Введ. 1995-01-01. М.: Стандартинформ, 2011. 17 с. [GOST 13496.4-93. Korma, kombikorma, kombikormovoe syr'e. Metody opredeleniya soderzha-niya azota i syrogo proteina. Vved. 1995-01-01. Moscow: Standartinform; 2011: 17 s. *(In Russ)*].

2. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с. [Dospekhov BA. Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovanii). 5-e izd., dop. i pererab. Moscow: Agropromizdat; 1985: 351 s. *(In Russ)*].

3. Корнилина В.В. Влияние ложного осинового трутовика (PHELLINUS TREMULAE BOND ET BORISS) на содержание пигментов в листьях осины в лесах Ульяновской области // Фундаментальные исследования. 2012. № 9-3. С. 568-572. [Kornilina VV. Influence of the false aspen tinder fungus (PHELLINUS TREMULAE BOND ET BORISS) on the maintenance of pigments in aspen leaves in the woods of the Ulyanovsk region. Fundamental Reserch. 2012;9-3:568-572. *(In Russ)*].

4. Методика исследований по культуре картофеля / отд. растениеводства и селекции Всесоюз. акад. с.-х. наук им. В.И. Ленина, НИИ картофельного хозяйства; редкол.: Н.А. Андрюшина и др. М., 1967. 225 с. [Metodika issledovanii po kul'ture kartofelya. Otd. rastenievodstva i selektsii Vsesoyuz. akad. s.-kh. nauk im. VI. Lenina, NII kartofel'nogo khozyaistva; redkol.: Andryushina NA., et al. Moscow, 1967: 225 s. *(In Russ)*].

5. Смашевский Н.Д. Практикум по физиологии растений: учеб. пособие. Астрахань: ИД «Астраханский университет», 2011. 77 с. [Smashevskii ND. Praktikum po fiziologii rastenii: ucheb. posobie. Astrakhan': ID «Astrakhanskii universitet»; 2011: 77 c. *(In Russ)*].

6. Asgari F, Majd A, Jonoubi P, Najafi F. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). Plant Physiol Biochem. 2018;127:152-160. doi: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021

7. Bao-shan L, Shao-qi D, Chun-hui L, Li-jun F, Shu-chun Q, Min Y. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. J of Forest Res. 2004;15(2):138-140. doi: https://doi.org/10.1007/BF02856749

8. Chitchumroonchokchai C, Diretto G, Parisi B, Giuliano G, Failla ML. Potential of golden potatoes to improve vitamin A and vitamin E status in developing countries. 2017;12(11):e0187102. doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187102

9. Crusciol CAC, Pulz AL, Lemos LB, Soratto RP, Lima GPP. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. Crop Sci. 2009;49(3):949-954. doi: https:// doi.org/10.2135/cropsci2008.04.0233

10. Deshmukh RK, Vivancos J, Ramakrishnan G, Guérin V, Carpentier G, Sonah H, Labbé C, Isenring P, Belzile FJ, Bélanger RR. A precise spacing between the NPA domains of aquaporins is essential for silicon permeability in plants. J Plant. 2015;83(3):489-500. doi: https://doi.org/10.1111/tpj.12904

11. Fraceto LF, Grillo R, de Medeiros GA, Scognamiglio V, Rea G, Bartolucci C. Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have? Front Environ Sci. 2016;4:20. doi: https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020

12. Gowayed SMH, Al-Zahrani HSM, Metwali EMR. Improving the salinity tolerance in potato (Solanum tuberosum) by exogenous application of silicon dioxide nanoparticles. Int J of Agric and Biol. 2017;19:183-194. doi: https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0262

13. Haynes MJ, Vincent K, Fischhoff C, Bremner AP, Lanlo O, Hankey GJ. Assessing the risk of stroke from neck manipulation: a systematic review. Int J Clin Pract. 2012;66(10):940-947. doi: https://doi.org/10.1111/j.1742-1241.2012.03004.x

14. Judy JD, Unrine JM, Rao W, Wirick S, Bertsch PM. Bioavailability of gold nanomaterials to plants: importance of particle size and surface coating. Environ Sci Technol. 2012;46(15): 8467-8474. doi: https://doi.org/10.1021/es3019397

15. Ma JF, Goto S, Tamai K, Ichii M. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. Plant Physiol. 2001;127(4):1773-1780. doi: https://doi.org/10.1104/pp.010271

16. Martin-Ortigosa S, Peterson DJ, Valenstein JS, Lin VSY, Trewyn BG, Lyznik LA, Wang K. Mesoporous silica nanoparticle-mediated intracellular cre protein delivery for maize genome editing via loxP site excision. Plant Physiol. 2014;164:537-547. doi: https://doi.org/10.1104/pp.113.233650

17. Nazaralian S, Majd A, Irian S, Najafi F, Ghahremaninejad F, Landberg T, Greger M. Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. Plant Physiol and Biochem. 2017;115:25-33. doi: https:// doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.009

18. Pilon C, Soratto RP, Moreno LA. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. Crop Sci. 2013;53(4):1605-1614. doi: https://doi.org/10.2135/cropsci2012.10.0580

19. Pošćić F, Mattiello A, Fellet G, Miceli F, Marchiol L. Effects of cerium and titanium oxide nanoparticles in soil on the nutrient composition of barley (Hordeum vulgare L.) kernels. Int J Environ Res Public Health. 2016;13(6):577. doi: https://doi.org/10.3390/ijerph13060577

20. Rad JS, Karimi J, Mohsenzadeh S, Rad MS, Moradgholi J. Evaluating SiO_2 nanoparticles effects on developmental characteristic and photosynthetic pigment contents of Zea mays L. Bull Environ Pharmacol Life Sci. 2014;3:194-201.

21. Reynolds GH. Forward to the future nanotechnology and regulatory policy. Pacific Res Inst. 2002;24:1-23.

22. Slomberg DL, Schoenfisch MH. Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. Environ Sci Technol. 2012;46(18):10247-10254. doi: https://doi.org/10.1021/es300949f

23. Stewart CR. Proline accumulation: biochemical aspects. Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants. Paleg LG, Aspinall D, editors. Sydney: Academic Press; 1981: 243-259.

24. Sun D, Hussain HI, Yi Z, Rookes JE, Kong L, Cahill DM. Mesoporous silica nanoparticles enhance seedling growth and photosynthesis in wheat and lupin. Chemosphere. 2016; 152:81-91. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.096

25. Vulavala VKR, Elbaum R, Yermiyahu U et al. Silicon fertilization of potato: expression of putative transporters and tuber skin quality. Planta. 2016;243(1):217-229. doi: https://doi.org/10.1007/s00425-015-2401-6

26. Wang F, Liu X, Shi Z, Tong R, Adams CA, Shi X. Arbuscular mycorrhizae alleviate negative effects of zinc oxide nanoparticle and zinc accumulation in maize plants–A soil microcosm experiment. Chemosphere. 2016;147:88-97. doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.076

27. Wei C, Zhang Y, Guo J, Han B, Yang X, Yuan J. Effects of silica nanoparticles on growth and photosynthetic pigment contents of Scenedesmus obliquus. J Environ Sci. 2010;22(1):155-160. doi: https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60087-5

28. Wintermans JFGM, Mots AD Spectrophotometric characteristics of chlorophylls a and b and their pheophytins in ethanol. Biochim Et Biophys Acta. 1965;109(2):448-453. doi: https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6

29. Yuvakkumar R, Elango V, Rajendran V, Kannan NS, Prabu P. Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (Zea mays L.). Int J of Green Nanotech. 2011;3(3):180-190. doi: https://doi.org/10.1080/19430892.2011.628581

30. Zaman MS, Ali GM, Muhammad A, Farooq K, Hussain I. In vitro screening of salt tolerance in potato (Solanum tuberosum L.) varieties. Sarhad J of Agric. 2015;31(2):106-113. doi: http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2015/31.2.106.113

31. Zhu H, Han J, Xiao JQ, Jin Y. Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. Journal Environment Monitoring. 2008;10:713-717. doi: https://doi.org/10.1039/B805998E

References

1. GOST 13496.4-93. Feed, compound feed, compound feed raw materials. Methods for determination of nitrogen and crude protein. Introd 1995-01-01. Moscow: Standartinform; 2011: 17 p.

2. Dospekhov BA. Field experiment methodology: (with the basics of statistical processing of research results). 5th ed. and reslave. Moscow: Agropromizdat: 1985: 351 p.

3. Kornilina VV. Influence of the false aspen tinder fungus (PHELLINUS TREMULAE BOND ET BORISS) on the maintenance of pigments in aspen leaves in the woods of the Ulyanovsk region. Fundamental Reserch. 2012;9-3:568-572.

4. Research methodology for potato culture. Dep of crop production and selection. All-Union. Acad. Agr. Sciences named after VI. Lenin, Research Institute of Potato; editorial: Andryushina NA, et al. Moscow, 1967: 225 p.

5. Smashevsky ND. Workshop on plant physiology: Textbook. Astrakhan: Publishing House Astrakhan University; 2011: 77 p.

6. Asgari F, Majd A, Jonoubi P, Najafi F. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). Plant Physiol Biochem. 2018;127:152-160. doi: https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021

7. Bao-shan L, Shao-qi D, Chun-hui L, Li-jun F, Shu-chun Q, Min Y. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. J of Forest Res. 2004;15(2):138-140. doi: https://doi.org/10.1007/BF02856749

8. Chitchumroonchokchai C, Diretto G, Parisi B, Giuliano G, Failla ML. Potential of golden potatoes to improve vitamin A and vitamin E status in developing countries. 2017;12(11):e0187102. doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187102

9. Crusciol CAC, Pulz AL, Lemos LB, Soratto RP, Lima GPP. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. Crop Sci. 2009;49(3):949-954. doi: https:// doi.org/10.2135/cropsci2008.04.0233

10. Deshmukh RK, Vivancos J, Ramakrishnan G, Guérin V, Carpentier G, Sonah H, Labbé C, Isenring P, Belzile FJ, Bélanger RR. A precise spacing between the NPA domains of aquaporins is essential for silicon permeability in plants. J Plant. 2015;83(3):489-500. doi: https://doi.org/10.1111/tpj.12904

11. Fraceto LF, Grillo R, de Medeiros GA, Scognamiglio V, Rea G, Bartolucci C. Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have? Front Environ Sci. 2016;4:20. doi: https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020

12. Gowayed SMH, Al-Zahrani HSM, Metwali EMR. Improving the salinity tolerance in potato (Solanum tuberosum) by exogenous application of silicon dioxide nanoparticles. Int J of Agric and Biol. 2017;19:183-194. doi: https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0262

13. Haynes MJ, Vincent K, Fischhoff C, Bremner AP, Lanlo O, Hankey GJ. Assessing the risk of stroke from neck manipulation: a systematic review. Int J Clin Pract. 2012;66(10):940-947. doi: https://doi.org/10.1111/j.1742-1241.2012.03004.x

14. Judy JD, Unrine JM, Rao W, Wirick S, Bertsch PM. Bioavailability of gold nanomaterials to plants: importance of particle size and surface coating. Environ Sci Technol. 2012;46(15): 8467-8474. doi: https://doi.org/10.1021/es3019397

15. Ma JF, Goto S, Tamai K, Ichii M. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. Plant Physiol. 2001;127(4):1773-1780. doi: https://doi.org/10.1104/pp.010271

16. Martin-Ortigosa S, Peterson DJ, Valenstein JS, Lin VSY, Trewyn BG, Lyznik LA, Wang K. Mesoporous silica nanoparticle-mediated intracellular cre protein delivery for maize genome editing via loxP site excision. Plant Physiol. 2014;164:537-547. doi: https://doi.org/10.1104/pp.113.233650

17. Nazaralian S, Majd A, Irian S, Najafi F, Ghahremaninejad F, Landberg T, Greger M. Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. Plant Physiol and Biochem. 2017;115:25-33. doi: https:// doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.009

18. Pilon C, Soratto RP, Moreno LA. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. Crop Sci. 2013;53(4):1605-1614. doi: https://doi.org/10.2135/cropsci2012.10.0580

19. Pošćić F, Mattiello A, Fellet G, Miceli F, Marchiol L. Effects of cerium and titanium oxide nanoparticles in soil on the nutrient composition of barley (Hordeum vulgare L.) kernels. Int J Environ Res Public Health. 2016;13(6):577. doi: https://doi.org/10.3390/ijerph13060577

20. Rad JS, Karimi J, Mohsenzadeh S, Rad MS, Moradgholi J. Evaluating SiO_2 nanoparticles effects on developmental characteristic and photosynthetic pigment contents of Zea mays L. Bull Environ Pharmacol Life Sci. 2014;3:194-201.

21. Reynolds GH. Forward to the future nanotechnology and regulatory policy. Pacific Res Inst. 2002;24:1-23.

22. Slomberg DL, Schoenfisch MH. Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. Environ Sci Technol. 2012;46(18):10247-10254. doi: https://doi.org/10.1021/es300949f

23. Stewart CR. Proline accumulation: biochemical aspects. Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants. Paleg LG, Aspinall D, editors. Sydney: Academic Press; 1981: 243-259.

24. Sun D, Hussain HI, Yi Z, Rookes JE, Kong L, Cahill DM. Mesoporous silica nanoparticles enhance seedling growth and photosynthesis in wheat and lupin. Chemosphere. 2016; 152:81-91. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.096

25. Vulavala VKR, Elbaum R, Yermiyahu U et al. Silicon fertilization of potato: expression of putative transporters and tuber skin quality. Planta. 2016;243(1):217-229. doi: https://doi.org/10.1007/s00425-015-2401-6

26. Wang F, Liu X, Shi Z, Tong R, Adams CA, Shi X. Arbuscular mycorrhizae alleviate negative effects of zinc oxide nanoparticle and zinc accumulation in maize plants–A soil microcosm experiment. Chemosphere. 2016;147:88-97. doi: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.076

27. Wei C, Zhang Y, Guo J, Han B, Yang X, Yuan J. Effects of silica nanoparticles on growth and photosynthetic pigment contents of Scenedesmus obliquus. J Environ Sci. 2010;22(1):155-160. doi: https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60087-5

28. Wintermans JFGM, Mots AD Spectrophotometric characteristics of chlorophylls a and b and their pheophytins in ethanol. Biochim Et Biophys Acta. 1965;109(2):448-453. doi: https://doi.org/10.1016/0926-6585(65)90170-6

29. Yuvakkumar R, Elango V, Rajendran V, Kannan NS, Prabu P. Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (Zea mays L.). Int J of Green Nanotech. 2011;3(3):180-190. doi: https://doi.org/10.1080/19430892.2011.628581

30. Zaman MS, Ali GM, Muhammad A, Farooq K, Hussain I. In vitro screening of salt tolerance in potato (Solanum tuberosum L.) varieties. Sarhad J of Agric. 2015;31(2):106-113. doi: http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2015/31.2.106.113

31. Zhu H, Han J, Xiao JQ, Jin Y. Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. Journal Environment Monitoring. 2008;10:713-717. doi: https://doi.org/10.1039/B805998E

Аминова Евгения Владимировна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела картофелеводства, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, 9 января, 29, сот.: 8-912-841-19-31, e-mail: aminowa.eugenia2015@yandex.ru

Мушинский Александр Алексеевич, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий отделом картофелеводства, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, 9 января, 29, сот.: 8-905-819-35-92, e-mail: san2127@yandex.ru

Короткова Анастасия Михайловна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, 9 января, 29; научный сотрудник Института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, e-mail: anastasiaporv@mail.ru

Дергилёва Тамара Тихоновна, старший научный сотрудник лаборатории селекции картофеля, Южно-Уральский научно-исследовательский институт садоводства и картофелеводства филиала ФГБНУ УрФАНИЦ УрОРАН 454902, г. Челябинск, посёлок Шершни, ул. Гидрострой, 16, e-mail: kartofel_chel@mail.ru

Поступила в редакцию 7 ноября 2019 г.; принята после решения редколлегии 16 декабря 2019 г.;
опубликована 31 декабря 2019 г. / Received: 7 November 2019; Accepted: 16 December 2019;
Published: 31 December 2019