

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 635.21:547.979.7:577.17

doi:10.33284/2658-3135-106-4-8

**Содержание хлорофилла у растений *SOLÁNUM TUBERÓSUM* под влиянием УДЧ молибдена**

**Александр Алексеевич Мушинский<sup>1</sup>, Алия Жоньсовна Саудабаева<sup>2</sup>, Татьяна Николаевна Васильева<sup>3</sup>**

<sup>123</sup>Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

<sup>1</sup>san2127@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3761-1836>

<sup>2</sup>aleka\_87@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5274-8657>

<sup>3</sup>vtn1972@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5469-3952>

**Аннотация.** В настоящее время нанотехнологии являются перспективным направлением в решении вопросов сельскохозяйственного сектора. Знания о способе действия, биосовместимости и экологической безопасности ультрадисперсных частиц минеральной и органоминеральной природы постепенно накапливаются на протяжении многих лет и имеют противоречивые результаты. В статье представлены исследования по изучению влияния ультрадисперсных частиц молибдена на растения *Solanum tuberosum*. Объектами исследования являлись растения картофеля сорта «Кузовок» и УДЧ молибдена. Тестирование биологической активности УДЧ молибдена на растениях картофеля проводилось на примере трёх концентраций молибдена (1, 2 и 4 мг/кг), в трёх повторностях. В ходе эксперимента было определено содержание хлорофилла  $\alpha$  и  $\beta$  в растениях *Solanum tuberosum* (спектрометрическим методом). В результате обработки клубней *Solanum tuberosum* УДЧ молибдена концентрацией 2 и 4 мг/кг содержание хлорофилла  $\alpha$  увеличилось на 52 и 40,2 % соответственно, хлорофилла  $\beta$  – на 15,1 и 10,6 %. При обработке растений концентрацией 1 мг/кг существенных различий по сравнению с контролем не получено. Увеличение содержания хлорофилла повлияло на полученную урожайность и товарность картофеля, максимальные показатели (43,1 т/га и 98,5 %) наблюдались во втором варианте обработки и были значительно больше, чем в контроле.

**Ключевые слова:** картофель, молибден, хлорофилл, наночастицы

**Благодарности:** работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2025 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (FNWZ-2023-0002).

**Для цитирования:** Мушинский А.А., Саудабаева А.Ж., Васильева Т.Н. Содержание хлорофилла у растений *SOLÁNUM TUBERÓSUM* под влиянием УДЧ молибдена // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 4. С. 8-17. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-8>

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

Original article

**Chlorophyll content in *SOLÁNUM TUBERÓSUM* plants under the influence of molybdenum UDP**

**Alexander A Mushinsky<sup>1</sup>, Aliya Zh Saudabaeva<sup>2</sup>, Tatyana N Vasilyeva<sup>3</sup>**

<sup>123</sup>Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

<sup>1</sup>san2127@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3761-1836>

<sup>2</sup>aleka\_87@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5274-8657>

<sup>3</sup>vtn1972@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5469-3952>

**Abstract.** Currently, nanotechnology is a promising direction in solving issues in the agricultural sector. Knowledge about the mode of action, biocompatibility and environmental safety of ultrafine particles of mineral and organomineral nature has gradually accumulated over many years and had contradicto-

ry results. The article presents the results of a study on the influence of ultrafine molybdenum particles on *Solanum tuberosum* plants. The objects of the study were potato plants of the “Kuzovok” variety and molybdenum UDC. Testing of the biological activity of molybdenum UDP on potato plants was carried out using three concentrations of molybdenum (1, 2 and 4 mg/kg), in triplicate. During the experiment, the content of chlorophyll  $\alpha$  and  $\beta$  in *Solanum tuberosum* plants was determined (by spectrometric method). As a result of treating *Solanum tuberosum* tubers with molybdenum UDP at a concentration of 2 and 4 mg/kg, the content of chlorophyll  $\alpha$  increased by 52 and 40.2 %, respectively, chlorophyll  $\beta$  - by 15.1 and 10.6%. There were no significant differences compared to the control when plants were treated with a concentration of 1 mg/kg. An increase in chlorophyll content affected the resulting yield and marketability of potatoes; the maximum values (43.1 t/ha and 98.5%) were observed in the second treatment option and were significantly higher than in the control.

**Keywords:** potato, molybdenum, chlorophyll, nanoparticles

**Acknowledgments:** the work was carried out in accordance with the research plan for 2022-2025 FSBSI FSC BST RAS (FNWZ-2023-0002).

**For citation:** Mushinsky AA, Saudabaeva AZh, Vasilyeva TN. Chlorophyll content in *SOLANUM TUBEROSUM* plants under the influence of molybdenum UDP. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):8-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-8>

### Введение.

В настоящее время нанотехнологии являются перспективным направлением в сельском хозяйстве. Наночастицы представляют собой частицы размером 1-100 нм (Feynman R, 1960; Pokrovivny VV and Skorokhod VV, 2007; Емельянова А.А. и Новикова А.А. 2022). Их классифицируют в зависимости от химической природы: органические и неорганические. Неорганические наночастицы – CuNP, AlNP, AgNP, SiNP, оксид цинка (ZnO), оксид церия (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), оксид титана (TiO<sub>2</sub>). Органическими наноматериалами являются полимеры, липиды и углеродные нанотрубки (Anandhi S et al., 2020; Selyutina OYu et al., 2020).

В связи со стремительным развитием нанотехнологий особенно актуальны исследования по влиянию нанопродуктов и нанопрепаратов на состояние сельскохозяйственных растений, например, для увеличения урожайности культур, улучшения качества продукции, устойчивости растений к различным инфекциям, снижения затрат на производство (Аминова Е.В. и др. 2020; Алиев А.А. и др., 2023). В сельском хозяйстве наноматериалы применяют в виде удобрений (An CC et al., 2022; Lau EC et al., 2020). Наноудобрения усиливают физиологические процессы в растениях, повышают их стрессоустойчивость. Использование наноматериалов в сельском хозяйстве уменьшает инвестиции при покупке удобрений и снижает затраты на эксплуатацию транспортных средств.

На сегодняшний день одной из наиболее широко возделываемых культур во всём мире является картофель, который за относительно короткое время даёт большое количество высококачественного продукта питания на единицу площади. Использование в сельскохозяйственном производстве ультрадисперсных частиц (УДЧ) металлов и неметаллов оказывает наименьшее загрязняющее действие на окружающую среду по сравнению с современными аналогами удобрений, так как УДЧ обеспечивают минимальные требования к концентрации, используемой для обработки растений и семян. Каждая наночастица является источником питания для растений.

По данным ряда учёных (Kolbert Z et al., 2022; Rastogi A et al., 2019; Lei C, 2018), исследования в области УДЧ продемонстрировали, что наночастицы могут напрямую воздействовать на клетки растений и влиять на физиологические процессы, причём стимулировать рост и развитие растений, повышать урожайность.

Другие учёные (Singh D and Kumar A, 2018) отметили, что обработка семян растений УДЧ значительно увеличивает энергию прорастания семян, растения становятся устойчивыми к неблагоприятным погодным условиям, а также отмечают повышение урожайности культур.

В настоящее время практическое исследование и использование молибдена в сельском хозяйстве занимает одно из ведущих мест среди других нанорастворов металлов. В литературе нет единого мнения о влиянии наночастиц металлов на физиологические и биохимические процессы в

растениях – отмечаются как положительные, так и отрицательные эффекты от использования коллоидных нанорастворов. Молибден является хорошим активатором антиоксидантных защитных механизмов растений в стрессовых условиях. Токсичность УДЧ металлов в 10-40 раз меньше токсичности солей этих же металлов (Лукин С.В. и Селюкова С.В., 2017; Mittal D et al., 2020).

Положительный результат исследований был получен у кукурузы, канолы, томатов, пшеницы и стручкового перца после обработки незначительными дозами наночастиц металлов/оксидов металлов:  $TiO_2$ , Fe,  $SiO_2$  (Короткова А.М. и др. 2019; Lau EC et al., 2020; Mittal D et al., 2020).

В растениях молибден распределяется неравномерно. В основе продукционного процесса лежит фотосинтез, однако его связь с продуктивностью не всегда однозначна, тем более при воздействии УДЧ молибдена. Фотосинтетическая активность листьев определяется содержанием в них пигментов – хлорофиллов  $\alpha$  и  $\beta$ . Главная роль хлорофилла  $\alpha$  в фотосинтезе состоит в преобразовании световой энергии в химическую. Хлорофилл  $\beta$  и каротиноиды выполняют роль сборщиков энергии (Закирова М.М. и др., 2022).

Тем не менее необходимо учитывать потенциальные риски и негативные последствия, связанные с применением нанотехнологий в сельском хозяйстве. Например, использование наночастиц может привести к их накоплению в почвах и водных ресурсах, что негативно сказывается на окружающей среде и здоровье человека. Таким образом, несмотря на перспективность использования нанотехнологий в аграрном секторе, необходимо продолжать изучение влияния наночастиц на растения и оценить их эффективность использования в производстве и возможные риски для человека (Алиев А.А. и др., 2023; Рыбакова Д.А. и Ульянич Е.А., 2023).

К сожалению, многие имеющиеся литературные данные по применению УДЧ трудно сопоставимы как по дозам, размерности УДЧ, так и по видам обрабатываемых растений. Вместе с тем важность исследований применения УДЧ в сельском хозяйстве очевидна, так как сельскохозяйственная продукция составляет основу продовольственной безопасности страны (Короткова А.М. и др., 2019; Lei C et al., 2018).

#### **Цель исследования.**

Анализ влияния УДЧ молибдена на содержание хлорофилла в *Solanum tuberosum*.

#### **Материалы и методы исследования.**

**Объект исследования.** Растения картофеля (*Solanum tuberosum*) сорта «Кузовок».

**Характеристика территорий, природно-климатические условия.** Полевые исследования проводили в Переволоцком районе Оренбургской области (КФК Хомутский В.И.). Почвы – чернозёмы южные, среднемощные, среднегумусные. Содержание гумуса в пахотном слое почвы составляет 3,2-4,0 %, общего азота – 0,20-0,31 %, общего фосфора – 0,14-0,22 %, подвижного фосфора – 15-25 мг, обменного калия – 300-380 мг в 1 кг почвы, рН почвенного раствора – 7,0-8,1. Наименьшая полевая влагоёмкость в слоях почвы 0-100 и 0-150 см составляет 297 мм (27,1 %) и 389 мм (25,4 %) соответственно.

**Схема эксперимента.** Семенной материал – Южно-Уральского научно-исследовательского института садоводства и картофелеводства-филиала ФГБНУ Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (г. Челябинск). Опыты закладывали с использованием методики полевого опыта (Доспехов Б.А., 1985). Повторность опыта – 3-кратная. Размеры делянок – 3,6 м×90 м. Экспериментальное тестирование биологической активности УДЧ молибдена на растениях картофеля проводилось на примере трёх концентраций молибдена (1, 2 и 4 мг/кг), в трёх повторностях: в фазу появления всходов, бутонизации и цветения. В исследованиях использовались УДЧ молибдена размером  $80 \pm 0.3$  нм и z-потенциалом  $27 \pm 0.12$  мВ, полученные плазмохимическим синтезом в компании «Плазмотерм» (г. Москва, Россия). Суспензии УДЧ молибдена готовили согласно ТУ 931800-4270760-96.

Для получения раствора различных концентраций на 500 мл дистиллированной воды вносили УДЧ Мо 1 мг/кг, 2 мг/кг, 4 мг/кг, при этом отдельно готовили контрольный раствор без добавления УДЧ Мо. Ультрадисперсные частицы диспергировали в ультрадисперсной ванне «Сапфир ТТЦ» (частота 35 кГц, 30 минут).

Для определения содержания хлорофилла листья отбирали со среднего яруса вегетативной части картофеля в фазу бутонизации и цветения. Содержание хлорофилла определяли спектрофотометрическим методом (Воробьев В.Н. и др., 2013). При проведении научных исследований использованы соответствующие стандарты и нормативно-техническая документация.

**Оборудование и технические средства.** Все лабораторные анализы выполнены с использованием приборной базы ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф>. Для проведения лабораторных исследований по изучению содержания хлорофилла в растениях использовалось оборудование: термостат ТСО-1/80 СПУ (Агроприбор, Россия), весы электронные ADAM HCB602H (Adam Equipment Co., Ltd., Великобритания), спектрофотометр UNICO 2100 (United products & instruments, США). Ультрадисперсные частицы диспергировали в ультрадисперсной ванне «Сапфир ТТЦ» (Россия). Для закладки полевых опытов использовались тракторы МТЗ-1221 и Т-25, культиватор КПС-4, борона БЗСС-1,0.

**Статистическая обработка.** Полученные результаты обрабатывали методами вариационной статистики с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» и применением программы «Excel» («Microsoft», США).

#### Результаты исследований.

Фотосинтетическая активность листьев определяется содержанием в них пигментов – хлорофиллов  $\alpha$  и  $\beta$ . В результате обработки клубней *Solanum tuberosum* УДЧ молибдена концентрацией 1, 2 и 4 мг/кг содержание хлорофилла  $\alpha$  увеличилось на 52 и 40,2 % соответственно. При обработке клубней *Solanum tuberosum* УДЧ молибдена концентрацией 2 и 4 мг/кг содержание хлорофилла  $\beta$  увеличилось на 15,1 и 10,6 %, при обработке с концентрацией 1 мг/кг существенных различий по сравнению с контролем не получено (рис. 1).

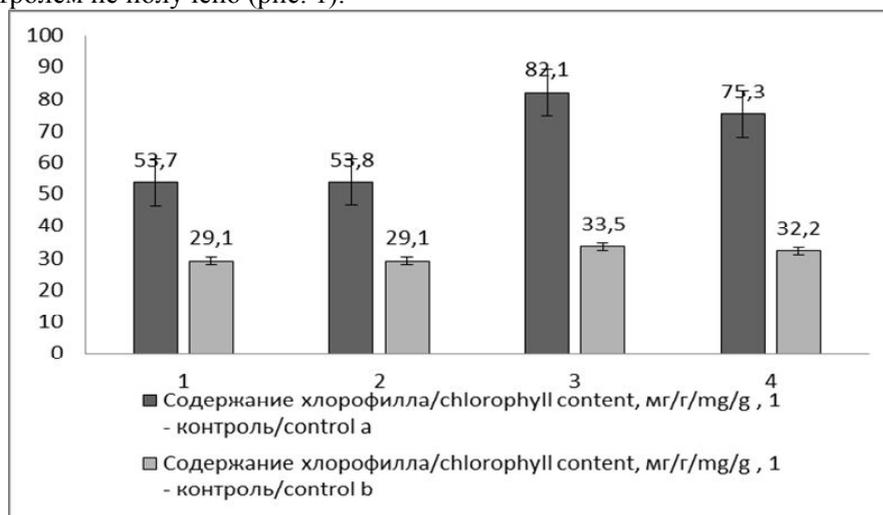


Рис. 1– Содержание хлорофилла  $\alpha$  и  $\beta$  в листьях *Solanum tuberosum* под влиянием обработок УДЧ молибдена, мг/г

Figure 1 – The content of chlorophyll  $\alpha$  and  $\beta$  in the leaves of *Solanum tuberosum* under the influence of treatments with molybdenum UDP, mg/g

Биохимический анализ клубней картофеля при обработке УДЧ молибдена в концентрации 1 и 2 мг/кг показал увеличение содержание сухого вещества в 1,27 раза, то есть значения варьировались по вариантам от 21 % до 16,5 %. Количественное содержание крахмала после обработки наноматериалом концентрацией 2 мг/кг максимально увеличилось в 1,4 раза в сравнении с контрольным вариантом. В результате обработки УДЧ молибдена концентрацией 4 мг/кг количество редуцированных сахаров в клубнях растений увеличилось в 2,6 раза по отношению к контрольному варианту исследований (рис. 2) и достигло 0,28 %, тогда как в контрольном опыте было 0,03 %.

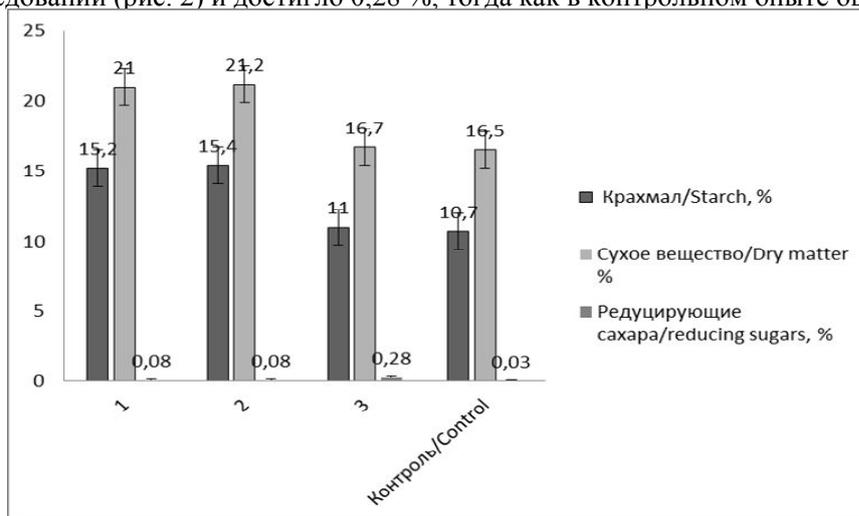


Рис. 2 – Результаты биохимического анализа клубней *Solanum tuberosum* под влиянием обработок УДЧ молибдена, %

Figure 2 – Results of biochemical analysis of *Solanum tuberosum* tubers under the influence of molybdenum UDP treatments, %

Результаты биохимического исследования содержания  $\text{NO}_3$  в клубнях *Solanum tuberosum* представлены в виде гистограммы (рис. 3) с распределением значений вариантов исследования, включая контрольные параметры. Из рисунка 3 видно, что основные значения распределяются в диапазоне значений 94-99 мг/кг, включая контрольный вариант. В клубнях картофеля при обработке наночастицами молибдена в 3 опытном варианте полученные значения нитратов в три раза превышали контрольный образец и составили 284 мг/кг; остальные варианты исследования отличались от контроля незначительно.

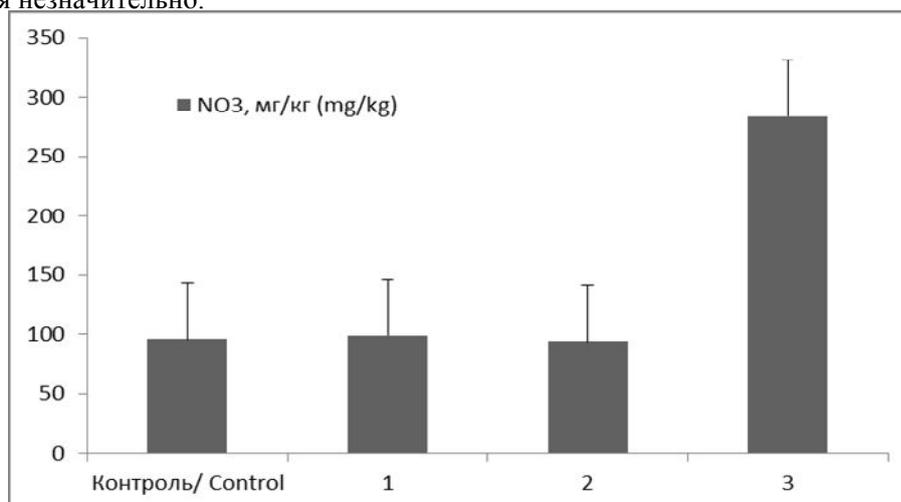


Рис. 3 – Гистограмма содержания  $\text{NO}_3$  в клубнях *Solanum tuberosum* в результате обработки УДЧ Mo

Figure 3 – Histogram of  $\text{NO}_3$  content in *Solanum tuberosum* tubers as a result of Mo UDP treatment

**Обсуждение полученных результатов.**

В результате проведённых исследований установлено, что при обработке УДЧ Мо в листьях картофеля увеличивается содержание хлорофилла  $\alpha$  и  $\beta$ . Обработка картофеля УДЧ Мо оказывает положительное влияние на урожайность, товарность и биохимические показатели клубней. В ряде исследований было показано, что оптимизация молибденового питания оказывает защитно-стимулирующее влияние на фотосинтетическую активность растений (Серегина И.И. и Ниловская Н.Т., 2020). Также была экспериментально показана способность УДЧ влиять на устойчивость растений к любым абиогенным и биогенным стрессам (Belanger MC et al., 2005).

Аналогичный результат прослеживался в работе Серегинной И.И. и Ниловской Н.Т. (2020): при использовании наночастиц молибдена в дозе 50 г/ц семян наблюдалось положительное влияние на содержание зелёных пигментов в 3-недельных проростках пшеницы. В исследовательской работе Голова Т.Г. с соавторами (2023) отметили, что у сортов западноевропейской группы пшеницы значительные прибавки продуктивности (в среднем 15,5 %) были у сортов Зузаза, Зусурен (20,0-23,6 %). Зерновая продуктивность растений с 1 м<sup>2</sup> максимально сопряжена с содержанием хлорофилла в фазу кущения:  $r=0,78$ . Уровень содержания хлорофилла в фазе кущения с высокой достоверностью положительно взаимосвязан с показателями продуктивной кустистости ( $r=0,75$ ;  $0,78$ ) и продуктивного стеблестоя ( $r=0,68$ ;  $0,75$ ); при использовании удобрений зависимость снижается.

Похожие результаты наблюдались в опытах Рыбаковой Д.А. и Ульянич Е.А. (2023): применение растворов ультрамикроэлементов в качестве предпосевной обработки семян зачастую способствовало снижению содержания хлорофилла и каротиноидов в листьях опытной культуры. Но при использовании солей селена и вольфрама в условиях высокой обеспеченности почвы фосфатами, напротив, была заметна тенденция к увеличению концентрации пигментов в листьях гречихи.

Таким образом, в литературных источниках приведено много данных экспериментов по оценке урожайности и биометрических параметров растений на примере УДЧ (Tripathi DK et al., 2017; Rizwan M et al., 2017). Одним из ожидаемых результатов применения нанотехнологий в аграрном секторе является улучшение качества и увеличение количества производимых сельскохозяйственных культур. Это может привести к увеличению доходов сельскохозяйственных производителей и улучшению пищевой безопасности на мировом уровне.

Кроме того, применение нанотехнологий может уменьшить нагрузку на окружающую среду и повысить устойчивость аграрного сектора в целом.

**Заключение.**

Обобщая полученные результаты по биологической активности УДЧ молибдена в отношении модельного растения *Solanum tuberosum*, можно заключить, что наночастицы молибдена оказывают положительное влияние на содержание хлорофилла  $\alpha$  и  $\beta$  в концентрациях 2 и 4 мг/кг.

Содержание нитратов в клубнях картофеля при обработке наночастицами в концентрации 4 мг/кг повышает значения количественного содержания NO<sub>3</sub> в отличие от контроля почти в три раза и составляет 284 мг/кг; остальные варианты исследований отличались от контроля незначительно.

Согласно результатам исследования, обработка растений картофеля УДЧ молибденом в концентрации 2 мг/ кг оказывает положительное влияние на урожайность и товарные качества клубней картофеля.

**Список источников**

1. Алиев А.А., Дабуев Т.И., Гериханов З.А. Разработка и применение нанотехнологий в аграрном секторе: состояние и перспективы // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 98-10. С. 176-179. [Aliyev AA, Dabuyev TI, Gerikhanov ZA. Razrabotka i primeneniye nanotekhnologiy v agrarnom sektore: sostoyaniye i perspektivy. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2023;98(10):176-179. (In Russ.)]. doi: 10.18411/trnio-06-2023-525

2. Аминова Е.В., Мушинский А.А., Саудабаева А.Ж. Стрессоустойчивость растений *Solanum tuberosum* под влиянием УДЧ диоксида кремния // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 3. С. 16-23. [Aminova EV, Mushinskiy AA, Saudabaeva AZh. Stress tolerance of *Solanum tuberosum* under the influence of silicon dioxide UFPs. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(3):16-23. (In Russ.)] doi: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-16>
3. Голова Т.Г., Ершова Л.А., Чевердина Г.В. Влияние минерального питания на продуктивность сортов ячменя // Зернобобовые и крупяные культуры. 2023. № 1(45). С. 109-120. [Golova TG, Ershova LA, Cheverdina GV. The effect of mineral nutrition on the productivity of barley varieties. Legumes and Groat Crops. 2023;1(45):109-120. (In Russ.)]. doi: 10.24412/2309-348X-2023-1-109-120
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с. [Dospikhov BA. Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniy). 5-e izd., dop. i pererab Moscow: Agropromizdat; 1985:351 p. (In Russ.)].
5. Емельянова А.А., Новикова А.А. Регуляторы роста, наночастицы и микроудобрения как факторы повышения урожайности растений путём обработки по вегетации в условиях стресса (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105, № 1. С. 130-138. [Emelyanova AA, Novikova AA. Growth regulators, nanoparticles and microfertilizers as factors for increasing plant productivity by vegetation treatment under stress (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):130-138. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-130>
6. Закирова М.М., Радчевский П.П., Тосунов Я.К. Содержание пигментов в листьях темнойгодных сортов винограда в зависимости от нагрузки кустов гроздьями // Вектор современной науки: сб. тезисов Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых (г. Краснодар, 15 нояб. 2022 г.). Краснодар: КГАУ им. И.Т. Трубилина, 2022. С. 134-135. [Zakirova MM, Radchevsky PP, Tosunov YK. The content of pigments in the leaves of dark-berry grape varieties depending on the load of bushes in clusters. (Conference proceedings) Vektor sovremennoj nauki: sb. tezisov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov i molodyh uchenyh (g. Krasnodar, 15 nojab. 2022 g.). Krasnodar: KGAU im. I.T. Trubilina; 2022:134-135. (In Russ.)].
7. Оценка влияния ультрадисперсных частиц на биометрические параметры проростков пшеницы / А.М. Короткова, С.В. Лебедев, О.В. Кван, К.Н. Атландерова // Животноводство и кормопроизводство. 2019. Т. 102. № 2. С.7-20. [Korotkova AM et al. Evaluation of ultrafine particles influence on biometric parameters of wheat germs. Animal Husbandry and Fodder Production. 2019;102(2):7-20. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-2-7
8. Лукин С.В., Селюкова С.В. Агроэкологическая оценка микроэлементного состава растений сои // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 6. С. 34-36. [Lukin SV, Selyukova SV. Agroecological assessment of microelement composition of soybean plants. Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex. 2017;31(6):34-36. (In Russ.)].
9. Практикум по физиологии растений: учеб.-метод. пособие / В.Н. Воробьев, Ю.Ю. Невмержицкая, Л.З. Хуснетдинова, Т.П. Якушенкова. Казань: Казан. ун-т, 2013. 80 с. [Vorob'ev VN, Nevmerzhickaya YuYu, Husnetdinova LZ, Yakushenkova TP. Praktikum po fiziologii rastenij: ucheb.-metod. posobie. Kazan': Kazanskij universitet; 2013:80 p. (In Russ.)].
10. Рыбакова Д.А., Ульянович Е.А. Влияние ультрамикроэлементов на содержание в листьях гречихи хлорофилла и каротиноидов в условиях засухи // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сб ст. XI Междунар. науч.-практ. конф., (г. Пенза, 15-16 марта 2023 г.) / под науч. ред. А.А. Галиуллина, В.А. Кошеляева, О.А. Тимошкина. Пенза: Пензен. гос. аграр. ун-т, 2023. С. 220-224. [Rybakova DA, Ul'janchich EA. Vlijanie ul'tramikrojelementov na sodержanie v list'jah grechih i karotinojdiv v uslovijah zasuhi. (Conference proceedings) Innovacionnyye tehnologii v APK: teorija i praktika: sb st. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., (g. Penza, 15-16 marta 2023 g.) pod nauch. red. Galiullina AA, Kosheljaeva VA, Timoshkina OA. Penza: Penzen. gos. agrar. un-t; 2023:220-224. (In Russ.)].

11. Серегина И.И., Ниловская Н.Т. Фотосинтетическая активность и донорно-акцепторные отношения растений яровой пшеницы при применении молибденовокислого аммония в условиях засухи // *Агрехимия*. 2020. № 7. С. 26-35. [Seregina II, Nilovskaia NT. Photosynthetic activity and donor-acceptor relations of spring wheat plants in the application of molybdenum-acid ammonium in drought conditions. *Agrohimia*. 2020;7:26-35. (*In Russ.*)]. doi: 10.31857/S0002188120070091
12. An C, Sun C, Li N, Huang B, Jiang J, Shen Y, Wang C, Zhao X, Cui B, Wang C, Li X, Zhan S, Gao F, Zeng Z, Cui H, Wang Y. Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *J Nanobiotechnol*. 2022;20:11. doi: 10.1186/s12951-021-01214-7
13. Anandhi S, Saminathan V, Yasotha P, Saravanan P, Rajanbabu V. Nano-pesticides in pest management. *J Entomol Zool Stud*. 2020;8:685-690.
14. Belanger MC, Ouellet M, Queney G, Moreau M. Taurine-deficient dilated cardiomyopathy in a family of golden retrievers. *J Am Anim Hosp Assoc*. 2005;41(5):284-291. doi: 10.5326/0410284
15. Feynman RP. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*. 1960;23(5):22-36.
16. Kolbert Z, Szöllösi R, Rónavári A, Molnár Á. Nanofoms of essential metals: from hormeticphytoeffects to agricultural potential. *J Exp Bot*. 2022;73(6):1825-1840. doi: 10.1093/jxb/erab547
17. Lau EC, Cavalho LB, Pereira AES, Montanha GS, Corrêa CG, Carvalho HWP, Ganin AY, Fraceto LF, Yiu HHP. Localization of coated iron oxide (Fe3O4) nanoparticles on tomato seeds and their effects on growth. *ACS Appl Bio Mater*. 2020;3-7:4109-4117. doi: 10.1021/acsabm.0c00216
18. Lei C, Sun Y, Tsang DCW, Lin D. Environmental transformations and ecological effects of iron-based nanoparticles. *Environmental Pollution*. 2018;232:10-30. doi: 10.1016/j.envpol.2017.09.052
19. Mittal D, Kaur G, Singh P, Yadav K, Ali SA. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: recent advances and future outlook. *Front Nanotechnol*. 2020;2:579954. doi: 10.3389/fnano.2020.579954
20. Pokropivny VV, Skorokhod VV. Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science. *Mater Sci Eng*. 2007;27(5-8):990-993. doi: 10.1016/j.msec.2006.09.023
21. Rastogi A, Tripathi DK, Yadav S, et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*. 2019;90:9. doi: 10.1007/s13205-019-1626-7
22. Rizwan M, Ali S, Qayyum MF, Ok YS, Adrees M, Ibrahim M, Zia-Ur-Rehman M, Farid M, Abbas F. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *J Hazard Mater*. 2017;322 (Part A):2-16. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.05.061
23. Selyutina OYu, Khalikov SS, Polyakov NE. Arabinogalactan and glycyrrhizin based nanopesticides as novel delivery systems for plant protection. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27;5864-5872. doi: 10.1007/s11356-019-07397-9
24. Singh D, Kumar A. Investigating long-term effect of nanoparticles on growth of *Raphanussativus* plants: a trans-generational study. *Ecotoxicology*. 2018;27(1):23-31. doi: 10.1007/s10646-017-1867-3
25. Tripathi DK, Shweta, Singh S, Singh S, Pandey R, Singh VP, Sharma NC, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK. An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017;110:2-12. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.07.030

## References

1. Aliyev AA, Dabuyev TI, Gerikhanov ZA. Development and application of nanotechnology in the agricultural sector: status and prospects. *Trends in the Development of Science and Education*. 2023;98(10):176-179. doi: 10.18411/trnio-06-2023-525

2. Aminova EV, Mushinskiy AA, Saudabaeva AZh. Stress tolerance of *Solanum tuberosum* under the influence of silicon dioxide UFPs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):16-23. doi: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-16>
3. Golova TG, Ershova LA, Cheverdina GV. The effect of mineral nutrition on the productivity of barley varieties. *Legumes and Groat Crops*. 2023;1(45):109-120. doi: [10.24412/2309-348X-2023-1-109-120](https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-1-109-120)
4. Dospekhov BA. Methodology of field experiment: (with the basics of statistical processing of research results). 5th ed., supplement. and revision. Moscow: Agropromizdat; 1985:351 p.
5. Emelyanova AA, Novikova AA. Growth regulators, nanoparticles and microfertilizers as factors for increasing plant productivity by vegetation treatment under stress (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(1):130-138. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-130>
6. Zakirova MM, Radchevsky PP, Tosunov YK. The content of pigments in the leaves of dark-berry grape varieties depending on the load of bushes in clusters. (Conference proceedings) *Vector of modern science: a collection of abstracts of the International scientific and practical conference of students and young scientists (Krasnodar, November 15, 2022)*. Krasnodar: KSAU named after I.T. Trubilin; 2022:134-135.
7. Korotkova AM, Lebedev SV, Kvan OV, Atlanderova KN. Evaluation of ultrafine particles influence on biometric parameters of wheat germs. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019;102(2):7-20. doi: [10.33284/2658-3135-102-2-7](https://doi.org/10.33284/2658-3135-102-2-7)
8. Lukin SV, Selyukova SV. Agroecological assessment of microelement composition of soybean plants. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2017;31(6):34-36.
9. Vorob'ev VN, Nevmerzchickaya Yu Yu, Husnetdinova LZ, Yakushenkova TP. *Practicum on plant physiology: textbook*. Kazan': Kazan University; 2013:80 p.
10. Rybakova DA, Ul'janich EA. Effect of ultramicroelements on the content of chlorophyll and carotenoids in buckwheat leaves under conditions of drought (Conference proceedings) *Innovative technologies in agro-industrial complex: theory and practice: a collection of articles XI International scientific-practical conference, (Penza, March 15-16, 2023)* edited by Galiullin AA, Koshelyaev VA, Timoshkin OA. Penza: Penza State Agrarian University; 2023:220-224.
11. Seregina II, Nilovskaia NT. Photosynthetic activity and donor-acceptor relations of spring wheat plants in the application of molybdenum-acid ammonium in drought conditions. *Agrochimia*. 2020;7:26-35. doi: [10.31857/S0002188120070091](https://doi.org/10.31857/S0002188120070091)
12. An C, Sun C, Li N, Huang B, Jiang J, Shen Y, Wang C, Zhao X, Cui B, Wang C, Li X, Zhan S, Gao F, Zeng Z, Cui H, Wang Y. Nanomaterials and nanotechnology for the delivery of agrochemicals: strategies towards sustainable agriculture. *J Nanobiotechnol*. 2022;20:11. doi: [10.1186/s12951-021-01214-7](https://doi.org/10.1186/s12951-021-01214-7)
13. Anandhi S, Saminathan V, Yasotha P, Saravanan P, Rajanbabu V. Nano-pesticides in pest management. *J Entomol Zool Stud*. 2020;8:685-690.
14. Belanger MC, Ouellet M, Queney G, Moreau M. Taurine-deficient dilated cardiomyopathy in a family of golden retrievers. *J Am Anim Hosp Assoc*. 2005;41(5):284-291. doi: [10.5326/0410284](https://doi.org/10.5326/0410284)
15. Feynman RP. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*. 1960;23(5):22-36.
16. Kolbert Z, Szöllösi R, Rónavári A, Molnár Á. Nanoforms of essential metals: from hormetic phytoeffects to agricultural potential. *J Exp Bot*. 2022;73(6):1825-1840. doi: [10.1093/jxb/erab547](https://doi.org/10.1093/jxb/erab547)
17. Lau EC, Cavalho LB, Pereira AES, Montanha GS, Corrêa CG, Carvalho HWP, Ganin AY, Fraceto LF, Yiu HHP. Localization of coated iron oxide (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles on tomato seeds and their effects on growth. *ACS Appl Bio Mater*. 2020;3-7:4109-4117. doi: [10.1021/acsabm.0c00216](https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00216)
18. Lei C, Sun Y, Tsang DCW, Lin D. Environmental transformations and ecological effects of iron-based nanoparticles. *Environmental Pollution*. 2018;232:10-30. doi: [10.1016/j.envpol.2017.09.052](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.052)

19. Mittal D, Kaur G, Singh P, Yadav K, Ali SA. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: recent advances and future outlook. *Front Nanotechnol.* 2020;2:579954. doi: 10.3389/fnano.2020.579954
20. Pokropivny VV, Skorokhod VV. Classification of nanostructures by dimensionality and concept of surface forms engineering in nanomaterial science. *Mater Sci Eng.* 2007;27(5-8):990-993. doi: 10.1016/j.msec.2006.09.023
21. Rastogi A, Tripathi DK, Yadav S, et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech.* 2019;90:9. doi: 10.1007/s13205-019-1626-7
22. Rizwan M, Ali S, Qayyum MF, Ok YS, Adrees M, Ibrahim M, Zia-Ur-Rehman M, Farid M, Abbas F. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. *J Hazard Mater.* 2017;322 (Part A):2-16. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.05.061
23. Selyutina OYu, Khalikov SS, Polyakov NE. Arabinogalactan and glycyrrhizin based nopenesticides as novel delivery systems for plant protection. *Environmental Science and Pollution Research.* 2020;27:5864-5872. (*In Russ.*). doi: 10.1007/s11356-019-07397-9
24. Singh D, Kumar A. Investigating long-term effect of nanoparticles on growth of *Raphanussativus* plants: a trans-generational study. *Ecotoxicology.* 2018;27(1):23-31. doi: 10.1007/s10646-017-1867-3
25. Tripathi DK, Shweta, Singh S, Singh S, Pandey R, Singh VP, Sharma NC, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK. An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry.* 2017;110:2-12. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.07.030

**Информация об авторах:**

**Александр Алексеевич Мушинский**, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией картофелеводства, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 89058193592.

**Алия Жонысовна Саудабаева**, кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела картофелеводства, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 89128411931.

**Татьяна Николаевна Васильева**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, учёный секретарь, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 89225438990.

**Information about authors:**

**Alexander A Mushinsky**, Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Leading Researcher, Head of the Potato Growing, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave, Orenburg, 460051, tel.: 89058193592.

**Aliya Z Saudabaeva**, Cand. Sci (Biology), Researcher, Department of Potato Growing, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave, Orenburg, 460051, tel.: 89128411931.

**Tatyana N Vasilyeva**, Cand. Sci (Biology), Senior Researcher, Scientific Secretary, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave, Orenburg, 460051, tel.: 89225438990.

Статья поступила в редакцию 05.10.2023; одобрена после рецензирования 22.11.2023; принята к публикации 11.12.2023.

The article was submitted 05.10.2023; approved after reviewing 22.11.2023; accepted for publication 11.12.2023.