

Л.В. Галактионова^{1, 2}, ✉
А.М. Короткова¹,
Н.А. Терехова²,
Н.И. Воскобулова¹,
С.В. Лебедев¹

¹ Федеральный научный центр
биологических систем и агротехнологий
Российской академии наук,
Оренбург, Российская Федерация

² Оренбургский государственный
университет, Оренбург, Российская
Федерация

✉ anilova.osu@mail.ru

Поступила в редакцию:
15.07.2022

Одобрена после рецензирования:
20.10.2022

Принята к публикации:
23.11.2022

Ludmila V. Galaktionova^{1, 2}, ✉
Anastasia M. Korotkova¹,
Nadezhda A. Terekhova²,
Nadezhda I. Voskobulova¹,
Svyatoslav V. Lebedev¹

¹ Federal Scientific Center for Biological
Systems and Agrotechnologies
of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russian Federation

² Orenburg State University,
Orenburg, Russian Federation

✉ anilova.osu@mail.ru

Received by the editorial office:
15.07.2022

Accepted in revised:
20.10.2022

Accepted for publication:
23.11.2022

Оценка использования наночастиц кремния и железа для предпосевной обработки семян *Pisum sativum*

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Современные технологии растениеводства связаны с использованием наноразмерных материалов для предпосевной обработки семян. В статье представлены результаты изучения влияния предпосевной обработки семян *Pisum sativum* растворами наночастиц оксидов железа и кремния на всхожесть, жизнеспособность и урожайность растений в условиях Южного Урала.

Методы. Для предпосевной обработки семян использовали растворы наночастиц SiO_2 и Fe_3O_4 в концентрациях 10^{-2} , 10^{-3} и 10^{-4} мг/л, а также раствор смеси двух оксидов. Жизнеспособность клеток оценивали по методу Vijayaraghavaraddi. Активность супероксиддисмутазы определяли по Гианнополитису и Райсу, каталазу, перекисное окисление липидов и содержание малонового диальдегида – по Heath и Packer, а фракционный состав белков в семенах – по Chen.

Результаты. Определение всхожести *P. sativum* показало значительную стимуляцию прорастания семян в вариантах обработки 10^{-3} мг/л Fe_3O_4 , 10^{-3} и 10^{-4} мг/л SiO_2 , а также Fe_3O_4 (10^{-3} мг/л) с SiO_2 (10^{-4} мг/л). Повышение активности каталазы наблюдали при обработке семян SiO_2 в двух концентрациях (до 83% и 146%), Fe_3O_4 (до 111%) и Fe_3O_4 + SiO_2 (до 47%). Отмечено снижение содержания малонового диальдегида в вариантах воздействия SiO_2 и его смеси с Fe_3O_4 (до 40%). На фоне использования наночастиц для предпосевной обработки семян состав белкового комплекса изменился за счет увеличения пула альбуминов на 88% и снижения содержания глобулинов до 9,8%.

Ключевые слова: всхожесть, предпосевная обработка, наночастицы, урожайность, *Pisum sativum*

Для цитирования: Галактионова Л.В., Короткова А.М., Терехова Н.А., Воскобулова Н.И., Лебедев С.В. Оценка использования наночастиц кремния и железа для предпосевной обработки семян *Pisum sativum*. *Аграрная наука*. 2022; 365 (12): 81–86. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-365-12-81-86>

© Галактионова Л.В., Короткова А.М., Терехова Н.А., Воскобулова Н.И., Лебедев С.В.

Evaluation of the use of silicon and iron nanoform for pre-sowing treatment of *Pisum sativum* seeds

ABSTRACT

Relevance. Modern plant growing technologies are associated with the use of nanoparticles for pre-sowing seed treatment. The article presents the results of studying the effect of pre-sowing treatment of *Pisum sativum* seeds with solutions of iron and silicon nanooxides on the germination, viability and yield of plants in the conditions of the Southern Ural.

Methods. For pre-sowing treatment of seeds, solutions of nanoparticles of SiO_2 and Fe_3O_4 were used at a concentration of 10^{-2} , 10^{-3} and 10^{-4} mg/l, as well as a solution of mixture of two oxides. Cell viability was assessed by the method of Vijayaraghavaraddi, superoxide dismutase activity was determined by Giannopolitis and Ries, catalase, lipid peroxidation and malondialdehyde content – by Heath and Packer, and the fractional composition of proteins in seeds – by Chen.

Results. Determination of the germination of *P. sativum* showed a significant stimulation of seed germination and an increase in catalase activity when seeds were treated with SiO_2 in two concentrations (up to 83% and 146%), Fe_3O_4 (up to 111%) and Fe_3O_4 + SiO_2 (up to 47%). A decrease in the content of malonic dialdehyde due to the treatment with SiO_2 and its mixture with Fe_3O_4 (up to 40%) was noted. Against the background of the use of nanoparticles for pre-sowing seed treatment, the composition of the protein complex changed due to an increase in the pool of albumins by 88% and a decrease in the content of globulins down to 9,8%.

Key words: germination, pre-sowing treatment, nanoparticles, productivity, *Pisum sativum*

For citation: Galaktionova L.V., Korotkova A.M., Terekhova N.M., Voskobulova N.I., Lebedev S.V. Evaluation of the use of silicon and iron nanoform for pre-sowing treatment of *Pisum sativum* seeds. *Agrarian science*. 2022; 365 (12): 81–86. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-365-12-81-86> (In Russian).

© Galaktionova L.V., Korotkova A.M., Terekhova N.A., Voskobulova N.I., Lebedev S.V.

Введение / Introduction

Инновационным подходом в обработке семян является использование наноматериалов, перечень которых определяется особенностями культурных растений и условиями культивирования [1–2]. Совокупность методов предпосевной обработки семян составами, главным компонентом которых являются наночастицы, получила название нано-прайминга. Инновационная технология повышает урожайность культурных растений за счет повышения их устойчивости к неблагоприятным факторам среды [3–5].

Нанокристаллические соединения (Fe, Mo, Zn, Cu, Co, Se) широко используются для предпосевной обработки семян по причине их активного участия в окислительно-восстановительных процессах, присутствия в составе многих ферментов и сложных белков. Кремний является одним из наиболее распространенных макроэлементов, однако его роль в процессах жизнедеятельности растений, в том числе и возможность его использования для предпосевной обработки семян, начала активно изучаться только в конце XX века [6–7].

Железо входит в состав каталитических центров многих окислительно-восстановительных ферментов и компонентов хлоропластов, что стимулирует развитие побегов и корневой системы растений. Наночастицы железа обладают высокой степенью биодоступности, что открывает широкие перспективы их использования в растениеводстве [8–10]. Таким образом, проблема поиска новых соединений для предпосевной обработки семян культурных растений может быть решена использованием различных наноразмерных материалов.

Цель исследования заключалась в оценке влияния предпосевной обработки семян гороха посевного (*Pisum sativum* L.) растворами наночастиц оксидов железа и кремния на всхожесть, окислительный статус, жизнеспособность и урожайность в условиях Южного Урала.

Материал и методы исследования / Materials and method

В исследовании использовались наночастицы (НЧ) SiO_2 (размером $30,7 \pm 0,3$ нм и ζ -потенциалом $27 \pm 0,12$ мВ, производства компании «Plasmotherm», Россия, <http://plasmotherm.ru>) и Fe_3O_4 (80–100 нм, ζ -потенциал $20 \pm 0,14$ мВ, производства компании «Передовые порошковые технологии», Россия, www.nanosized-powders.com). Растворы готовили путем смешивания навески наночастиц с деионизированной водой с последующей обработкой ультразвуком (35 кГц, 30 минут). Для обработки семян использовали следующие концентрации Fe_3O_4 и SiO_2 : 10^{-2} ; 10^{-3} и 10^{-4} мг/л; раствор обоих оксидов получали путем смешивания растворов Fe_3O_4 (10^{-3} мг/л) и SiO_2 (10^{-4} мг/л) в соотношении 1:1.

Для сравнения эффективности использования наночастиц железа и кремния был использован препарат «Мивал-Агро» компании ООО «АгроСил» (Россия, <http://agrosil.ru>). Контрольный вариант опыта включал использование семян без обработки.

В качестве объекта исследования использовали горох сорта Флагман 12. Семена были предоставлены ФГБНУ «Самарский НИИСХ» (Россия, <http://samniish.ru>).

Первый этап эксперимента начинали с предварительной обработки семян *P. sativum* растворами различных агентов (H_4SiO_4 , Fe_3O_4 , «Мивал-Агро») с последующим подсушиванием. Для определения действующих концентраций семена проращивали по в чашках Петри согласно ГОСТ 12038-84. После проведенных исследований были выбраны концентрации, продемонстрировавшие стимулирующее влияние на рост и развитие семян.

Подготовка почвы к модельному эксперименту осуществлялась согласно общепринятой методике, после чего ее помещали в пластиковые контейнеры. В почву добавляли дистиллированную воду, перемешивали до образования густой кашеобразной массы с влажностью 40–45%. Далее в контейнеры сеяли по 20 семян гороха и выращивали в климатической камере «Pol-eko KK 1200 TOP+» («Pol-Eko-Aparatura», Польша) при относительной влажности воздуха 30%, температуре воздуха $25 \pm 2^\circ\text{C}$, и температуре субстрата $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Через интервалы 15, 25 и 35 дней после появления всходов производили отбор и анализ растительных образцов.

Оценка жизнеспособности клеток осуществлялась путем их окрашивания 0,25%-ным водным раствором эванса синего («Sigma», USA) с визуализацией под световым микроскопом и количественной оценкой спектрофотометрическим методом [11]. Общую активность супероксиддисмутазы (СОД) определяли по Гианнополитису и Райсу, каталазы (КАТ) и продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) – по содержанию малонового диальдегида (МДА) как описано ранее [12–13].

Полевой этап эксперимента проводился на участке полевого стационара Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН, расположенного близ п. Нежинка Оренбургской области России ($51^\circ 46' 4''\text{N}$, $55^\circ 22' 7''\text{E}$). Общий размер участка 990 м^2 далее был разделен на 20 делянок площадью $49,5 \text{ м}^2$ ($1,65 \times 30$). Почва участка была представлена черноземом южным. Характеристика почв представлена в табл. 1. Перед посевом на участке проводилась двукратная культивация с целью уничтожения сорняков, рыхления, выравнивания почвы и создания плотного ложа для семян.

Семена гороха обрабатывали одним из растворов с нормой расхода 10 л на 1 т семян и высевали в почву. В опыте применяли общепринятую для зоны технологию возделывания гороха. Поскольку условия вегетации были засушливыми, засоренность делянок сорняками была слабой, в мероприятиях по уходу за делянками не было необходимости. После уборки урожая семена, собранные с каждого варианта опыта, размалывали и анализировали по методу фракционирования белков [14]. Экспериментальные данные были обработаны на основе методов математической статистики с использованием Microsoft Excel и MathCad. Полученные данные представлены с доверительным коэффициентом 0,95.

Таблица 1. Характеристика почвенного покрова опытного участка, $M \pm m$
Table 1. Characteristics of the soil cover of the experimental site, $M \pm m$

Показатель	Значение	Показатель	Значение
Содержание физической глины, %	$30,6 \pm 0,73$	N-NO_3 , мг/кг почвы	$13,5 \pm 0,34$
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	$7,2 \pm 0,82$	P_2O_5 , обменный, мг/кг	$21,2 \pm 0,52$
Гумус, %	$4,1 \pm 0,09$	K_2O , обменный, мг/кг	$315 \pm 0,41$

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Лабораторный опыт по определению всхожести семян *P. sativum* продемонстрировал наиболее выраженный положительный эффект и достоверное стимулирование прорастания относительно контроля в вариантах обработки 10^{-3} мг/л Fe_3O_4 , 10^{-3} и 10^{-4} мг/л SiO_2 , а также Fe_3O_4 (10^{-3} мг/л) с SiO_2 (10^{-4} мг/л) в соотношении 1:1, что согласуется с литературными данными [15]. Помимо суспензий HCl Fe_3O_4 и SiO_2 , продемонстрировал свою эффективность и модельный препарат «Мивал-Агро».

На рис. 1а показано прямо пропорциональное увеличение жизнеспособности клеток после обработки растений растворами HCl SiO_2 в концентрациях 10^{-3} и 10^{-4} мг/л (до 61,1 и 67,2% относительно растений положительного контроля – 100% мертвых клеток) и Fe_3O_4 + SiO_2 (до 55%).

Наиболее выраженный эффект проявлялся у растений, семена которых были обработаны HCl SiO_2 в разведении 10^{-4} мг/л. Результаты исследования демонстрируются микроскопией окрашенных фрагментов корня (рис. 1б).

Активность СОД и КАТ в зеленой массе растений гороха характеризовались различной динамикой в ходе экспозиции эксперимента (рис. 2).

Активность КАТ у проростков была ниже контроля в первые две недели на 50–60%, на 25-й день происходило увеличение показателя до уровня интактных растений. А резкое увеличение активности фермента, отмеченное на 35-й день эксперимента, свидетельствует о наращивании активного пула фермента.

КАТ является основным антиоксидантом в растениях, который предотвращает их окислительное повреждение и выступает в качестве нейтрализатора радикалов. Повышение КАТ регистрировалось после обработки семян SiO_2 в двух концентрациях (до 83% и 146%), Fe_3O_4 (до 111%) и Fe_3O_4 + SiO_2 (до 47%) ($P < 0,05$).

Различия в значениях активности СОД были менее контрастны: так, небольшое увеличение показателя (свыше 30%) относительно контроля отмечено в растениях на 25-й день их роста ($P < 0,05$). При этом на 35-й день уровень СОД снижался до контрольного значения, что говорит об эффективной нейтрализации супероксид-радикалов и интенсификации работы каталазы.

Одним из показателей степени развития окислительного стресса у растений является значение перекисного окисления липидов клеточных мембран – малонового диальдегида (МДА). Свободные радикалы, окисляя липиды клеточной мембраны, делают ее проницаемой для ионов и органических кислот. Анализ степени перекисного окисления липидов показал, что предпосевная обработка семян *P. sativum* наночастицами оказывает разнонаправленное влияние, зависящее от фазы роста. Так, на 25-й день эксперимента регистрировалось небольшое увеличение уровня МДА по сравнению с контролем в случае обработки 10^{-3} и 10^{-4} мг/л SiO_2 и смесью Fe_3O_4 + SiO_2 . Однако показатель был намного меньше уровня после обработки препаратом «Мивал-Агро» (в 1,5–2 раза). В условиях эксперимента в течение 35 дней слабая интенсивность накопления МДА в вариантах воздействия SiO_2 и его смеси с Fe_3O_4 (не более 40%) свидетельствует об устойчивости растений к воздействию внешних факторов.

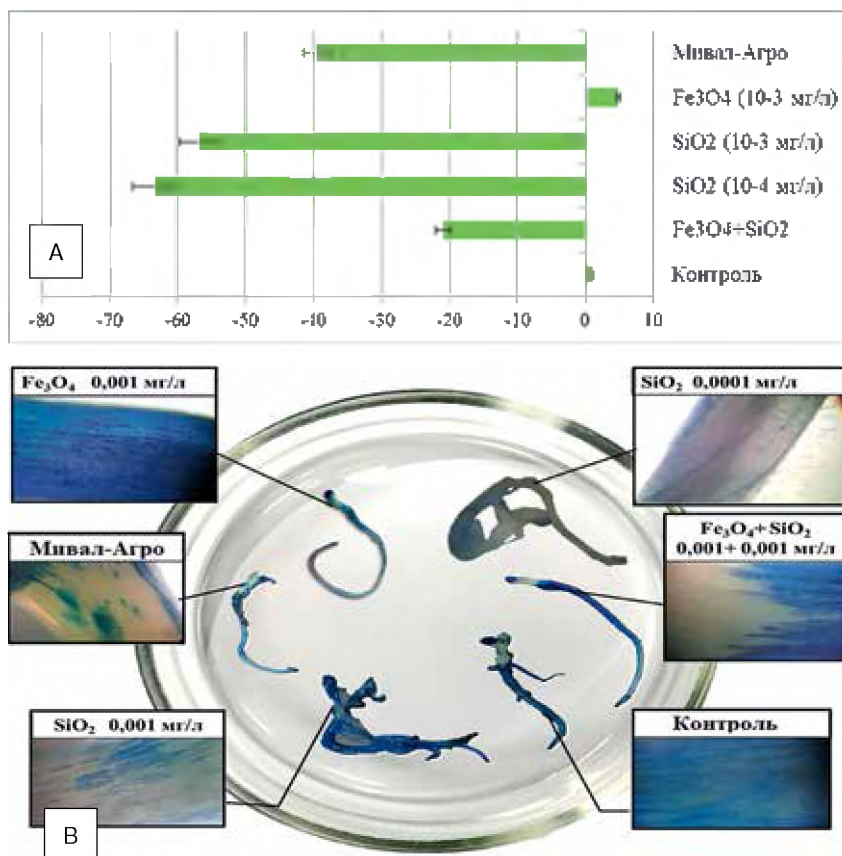
В свою очередь, в растениях, выросших на фоне обработки раствором Fe_3O_4 , установлено увеличение содержания МДА во всем временном диапазоне экспозиции (от 15 до 35 дней), сопоставимое с воздействием препарата «Мивал-Агро» – до 176% ($P < 0,05$). Эти результаты показали, что наночастицы также могут привести к образованию свободных радикалов и нарушению целостности мембраны.

Активность СОД и КАТ являются показателями антиоксидантной защиты клеток растений при воздействии стрессовых факторов, в том числе аномальных погодных условий, избытка или недостатка микроэлементов.

Погодные условия полевого опыта, сложившиеся в период вегетации гороха *P. sativum*, можно охарактеризовать как крайне неблагоприятные: экстремально высокая температура воздуха (30–40 °C) при недостаточном атмосферном увлажнении и среднесуточном дефиците влажности воздуха (от 13 до 21 мм). Количество осадков, выпавших в летний период, составило 35 мм, что соответствует не более 40% от сред-

Рис. 1. Жизнеспособность корней *P. sativum* после предпосевной обработки семян растворами агентов: а – диаграмма, % от контроля; б – фото клеток корня в зоне растяжения. (Фото автора)

Fig. 1. Viability of *P. sativum* roots after pre-sowing treatment of seeds with solutions of agents: а – diagram, % of control; б – photos of root cells in the stretch zone. (Photo by the author)



немногочисленных значений. К фазе полной спелости зерна гороха продуктивной влаги до глубины 60 см не было, в метровом слое почвы осталось 6 мм (табл. 2).

Влагообеспеченность посевов гороха за период от всходов до полной спелости зерна составила 28,4% от потребности во влаге растений. Ввиду отрицательного влияния вышеуказанных факторов урожайность зерна была низкой – 1,9–2,6 ц с 1 гектара, при этом разница по вариантам опыта была недостоверной.

Анализ структуры урожайности зерна показывает, что по количеству бобов на растении, семян в бобе и массе зёрен варианты обработки препаратами находятся на уровне или уступают контрольному варианту.

Положительное влияние на рост растения оказала предпосевная обработка семян H_2SiO_2 , Fe_3O_4 и препаратом органического кремния «Мивал-Агро».

Анализ содержания протеинов в семенах *P. sativum* после выращивания в полевых условиях показал вы-

Рис. 1. Активность антиоксидантных ферментов и МДА у *P. sativum* после предпосевной обработки семян: 1 – раствором $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SiO}_2$; 2 – раствором Fe_3O_4 в концентрации 10^{-3} мг/л; 3 – раствором SiO_2 в концентрации 10^{-3} мг/л; 4 – раствором SiO_2 в концентрации 10^{-4} мг/л; 5 – «Мивал-Агро»

Fig. 1. Activity of antioxidant enzymes and MDA in *P. sativum* after pre-sowing seed treatment: 1 – $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SiO}_2$ solution; 2 – Fe_3O_4 solution with a concentration of 10^{-3} mg/l; 3 – solution with a SiO_2 concentration of 10^{-3} mg/l; 4 – SiO_2 solution with a concentration of 10^{-4} mg/l; 5 – “Mival-Agro”

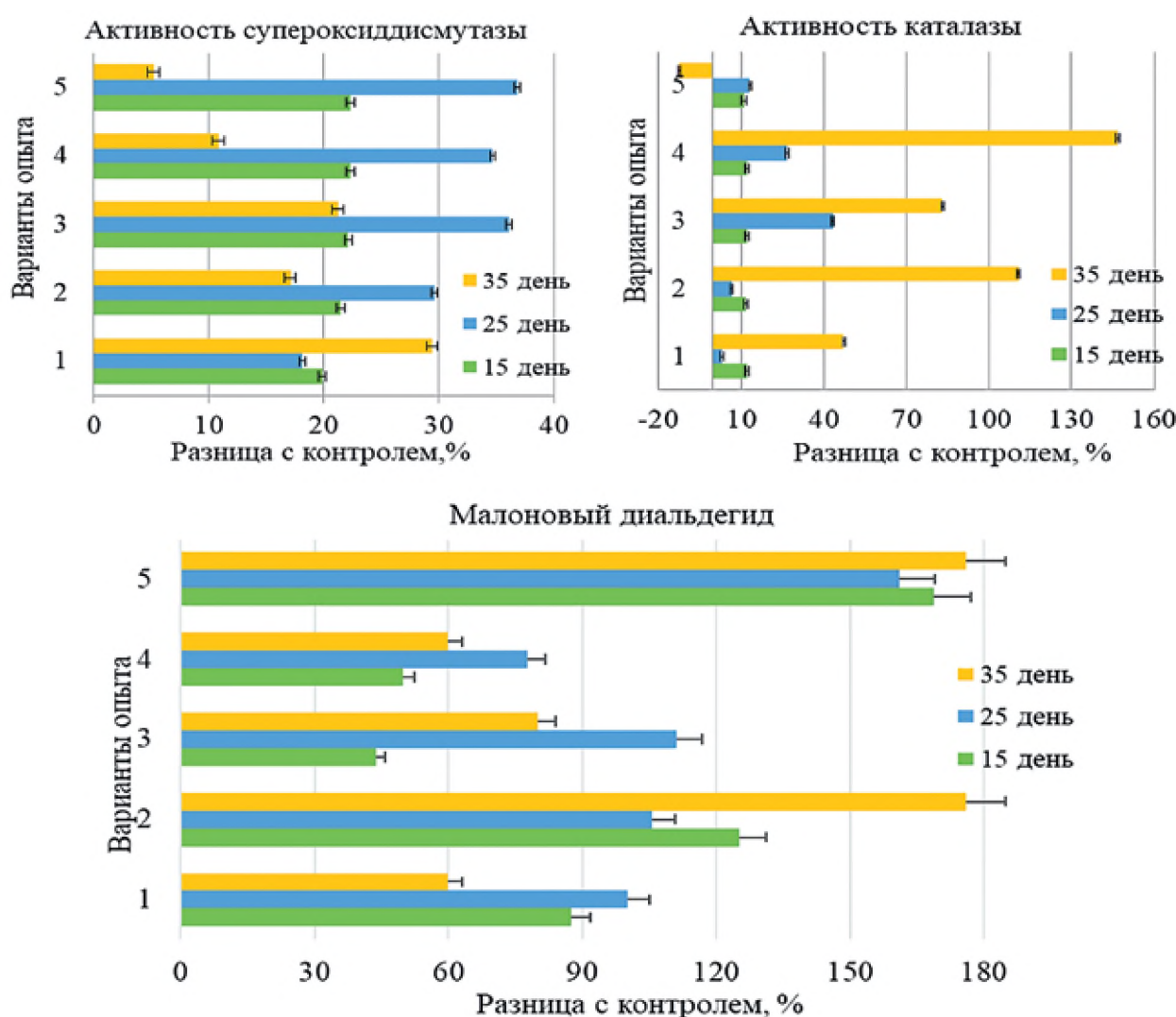
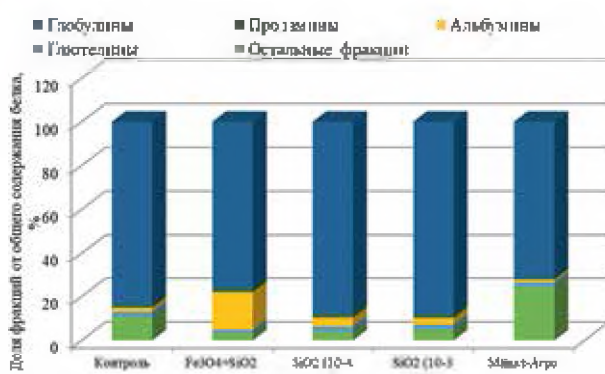


Таблица 2. Продуктивность *P. sativum* в полевых условиях
Table 2. Productivity of *P. sativum* in the field

Вариант	Количество растений, шт./м ²	Масса семян, г			Высота растений, см	Урожайность зерна, ц/га
		с 1 м ²	1000 семян	с 1 растения		
Контроль	88	27,7	206	0,29	32	1,9
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SiO}_2$ ($10^{-3}+10^{-4}$ мг/л)	88	32,4	206	0,37	34	2,5
Fe_3O_4 (10^{-3} мг/л)	94	20,9	205	0,22	34	2,0
SiO_2 (10^{-4} мг/л)	95	28,6	206	0,30	35	2,6
«Мивал-Агро»	93	34,3	204	0,37	36	2,2

Рис. 3. Содержание различных фракций белка в семенах *P. sativum*Fig. 3. The content of various protein fractions in *P. sativum* seeds

раженное увеличение пула альбуминов после экспонирования со смесью $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SiO}_2$ на 88% (рис. 3). Содержание глобулинов при этом уменьшилось до 9,8% относительно контроля.

В вариантах обработки растений раствором HCl SiO_2 отмечено небольшое увеличение суммы глобулинов относительно контроля – не более чем на 5% – с одновременным снижением фракции глютенина. Ранее в исследовании растений риса было установлено увеличение содержания отдельных фракций белковых соединений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование подготовлено в соответствии с государственным заданием, выданным Минобрнауки РФ, на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075-03-2022-401 от 12 января 2022 г. «Разработка и эколого-экономическое обоснование технологии рекультивации нарушенных горно-металлургическим комплексом земель на основе мелиорантов и удобрений нового типа»; выполнено совместно с сотрудниками Центра коллективного пользования (ЦКП) с использованием фондов Центра коллективного пользования научным оборудованием ФНЦ БСТ РАН (No Росс RU.0001.21 ПФ59, Единый российский реестр центров коллективного пользования – <http://www.ckp-rf.ru/ckp/77384>).

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдова Н.В., Замана С.П., Крохмаль И.И., Резеткин А.М., Романова Е.С., Ольховская И.П., Богословская О.А., Яблоков А.Г., Глушенко Н.Н. Показатели яровой пшеницы в ответ на обработку семян наночастицами металлов. *Российские нанотехнологии*. 2019. Т. 14. № 11–12: 64–74. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-11-12-64-74>
2. Hoe P.T., Mai N.C., Lien L., Ban N., Van M., Chau N.H., Buu N.Q., Hien D.T. Germination responses of soybean seeds under Fe, ZnO, Cu and Co nanoparticle treatments. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2018; 20(7):1562–1568. DOI:10.17957/IJAB/15.0670
3. Nile S.H., Thiruvengadam M., Wang Y., Samynathan R., Shariati M.A., Rebezov M., Nile A., Sun M., Venkidasamy B., Xiao J., Kai G. Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture-recent developments and future perspectives. *Journal of nanobiotechnology*. 2022; 20(1): 254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>
4. Santo P.A.E., Oliveira H.C., Fraceto L.F., Santaella C. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*. 2021; 11: 267. <https://doi.org/10.3390/nano11020267>
5. Shelar A., Singh A.V., Maharjan R.S., Laux P., Luch A., Gemmati D., Tisato V., Singh S.P., Santilli M.F., Shelar A., Chaskar M., Patil R. Sustainable agriculture through multidisciplinary seed nanoprimer: prospects of opportunities and challenges. *Cells*. 2021; 10(9): 2428. <https://doi.org/10.3390/cells10092428>

В исследовании Zhao с коллегами (2014) показано, что HCl ZnO не влияли на фракции белка, однако SeO_2 в дозе 400 мг/кг увеличивал сумму глобулинов [16].

Отметим увеличение содержания глютенина после предпосевной обработки препаратом «Мивал-Агро» до 50%, что, вероятно, вызвано специфической активацией белкового обмена.

Выводы / Conclusion

Изучение влияния различных составов наносоединений в сравнении с органическим аналогом «Мивал-Агро» в условиях лабораторного опыта показало, что эффективными для достоверного стимулирования прорастания семян и проростков являются $\text{HCl Fe}_3\text{O}_4$ (10^{-3} мг/л), SiO_2 (10^{-3} и 10^{-4} мг/л) и их смесь $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SiO}_2$. Обработка семян суспензиями наночастиц SiO_2 в концентрациях 10^{-4} мг/л и Fe_3O_4 усиливает устойчивость к воздействию внешних факторов. Результаты полевого опыта не продемонстрировали достоверного увеличения всхожести и урожайности, что связано с засушливыми условиями периода вегетации. А влияние предпосевной обработки семян суспензией наночастиц на состав белкового комплекса имеет сходный для культурных растений характер, и не носит элементно- и/или видоспецифического характера.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения и внедрения нанотехнологических решений в практику растениеводства.

FUNDING

The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education in accordance with the state assignment on science for Ural State Mining University № 075-03-2022-401 dated 12 January 2022 "Development and environmental and economic substantiation of the technology for reclamation of land disturbed by the mining and metallurgical complex based on reclamation materials and fertilizers of a new type". We obtain the scientific results with the staff of Center for the collective use by using the equipment of the Center for the collective use of scientific equipment of the Federal Scientific Center of biological systems and agricultural technologies of RAS (No Ross RU.0001.21 PF59, the Unified Russian Register of Centers for Collective Use – <http://www.ckp-rf.ru/ckp/77384>).

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

1. Davydova N.V., Zamana S.P., Krokhmal I.I., Rezetkin A.M., Romanova E.S., Olkhovskaya I.P., Bogoslovskaya O.A., Yablokov A.G., Glushchenko N.N. Spring wheat indicators in response to seed treatment with metal nanoparticles. *Russian nanotechnologies*. 2019. Vol. 14. No. 11–12: 64–74. <https://doi.org/10.21517/1992-7223-2019-11-12-64-74> (In Russian)
2. Hoe P.T., Mai N.C., Lien L., Ban N., Van M., Chau N.H., Buu N.Q., Hien D.T. Germination responses of soybean seeds under Fe, ZnO, Cu and Co nanoparticle treatments. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2018; 20(7):1562–1568. DOI:10.17957/IJAB/15.0670
3. Nile S.H., Thiruvengadam M., Wang Y., Samynathan R., Shariati M.A., Rebezov M., Nile A., Sun M., Venkidasamy B., Xiao J., Kai G. Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture-recent developments and future perspectives. *Journal of nanobiotechnology*. 2022; 20(1): 254. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>
4. Santo P.A.E., Oliveira H.C., Fraceto L.F., Santaella C. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*. 2021; 11: 267. <https://doi.org/10.3390/nano11020267>
5. Shelar A., Singh A.V., Maharjan R.S., Laux P., Luch A., Gemmati D., Tisato V., Singh S.P., Santilli M.F., Shelar A., Chaskar M., Patil R. Sustainable agriculture through multidisciplinary seed nanoprimer: prospects of opportunities and challenges. *Cells*. 2021; 10(9): 2428. <https://doi.org/10.3390/cells10092428>

6. Mushtaq A., Rizwan S., Jamil N., Ishtiaq T., Irfan S., Ismail T., Malghani M.N., Shahwani M.N. Influence of silicon sources and controlled release fertilizer on the growth of wheat cultivars of Balochistan under salt stress. *Pakistan Journal of Botany*. 2019; 51: 1561–1567. [https://doi.org/10.30848/PJB2019-5\(44\)](https://doi.org/10.30848/PJB2019-5(44))
7. Ahmad A., Hashmi S.S., Palma J.M., Corpas F.J. Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology. *Chemosphere*. 2022; 290: 133329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133329>
8. Khan M.R., Adam V., Rizvi T.F., Zhang B., Ahamad F., Josko I., Zhu Y., Yang M., Mao C. Nanoparticle-plant interactions: two-way traffic. *Small*. 2019; 15(37): 1613–6810. <https://doi.org/10.1002/smll.201901794>
9. Palchoudhury S., Jungjohann K.L., Weerasena L., Arabshahi A., Gharge U., Albattah A., Miller J., Patel K., Holler R.A. Enhanced legume root growth with pre-soaking in α -Fe₂O₃ nanoparticle fertilizer. *RSC Advances*. 2018; 8(43): 24075–24083. <https://doi.org/10.1039/c8ra04680h>
10. Verma K.K., Song X.-P., Joshi A., Tian D.-D., Rajput V.D., Singh M., Arora J., Minkina T., Li Y.R. Recent trends in nano-fertilizers for sustainable agriculture under climate change for global food security. *Nanomaterials*. 2022; 12(1): 173. <https://doi.org/10.3390/nano12010173>
11. Vijayaraghavareddy P., Vemanna R.S., Yin X., Struik P.C., Makarla U., Sreeman S.M. Acquired traits contribute more to drought tolerance in wheat than in rice. *Plant Phenomics*. 2020(3):1–16. <https://doi.org/10.34133/2020/5905371>
12. Гавриш И.А., Лебедев С.В., Короткова А.М., Кван О.В. Влияние металлических наночастиц на физиолого-биохимические показатели Пшеницы мягкой. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2019; 81(1):263–268. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-263-268>
13. Ehrhardt-Brocardo M.N.C., Coelho C.M.M., Souza C.A. Storage protein composition during germination and its association with physiological seed quality in common bean. *Acta Scientiarum – Agronomy*. 2022; 44(1):e53434. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53434>
14. Nazarian S., Majd A., Iranian S., Najafi F., Ghahremaninejad F., Landberg T., Greger M. Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. *Plant physiology and biochemistry*. 2017; 115: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.009>
15. Wang W., Peng H., Huang J., Cui K., Nie L. Effect of storage condition and duration on the detection of primed rice seed. *Front Plant Sci*. 2018; 172: 9–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00172>
16. Gong C., Wang L., Li X., Wang H., Jiang Y., Wang W. Responses of seed germination and shoot metabolic profiles of maize (*Zea mays* L.) to Y2O₃ nanoparticle stress. *RSC Advances*. 2019; 9(47): 27720–27731. <https://doi.org/10.1039/C9RA04672K>
6. Mushtaq A., Rizwan S., Jamil N., Ishtiaq T., Irfan S., Ismail T., Malghani M.N., Shahwani M.N. Influence of silicon sources and controlled release fertilizer on the growth of wheat cultivars of Balochistan under salt stress. *Pakistan Journal of Botany*. 2019; 51: 1561–1567. [https://doi.org/10.30848/PJB2019-5\(44\)](https://doi.org/10.30848/PJB2019-5(44))
7. Ahmad A., Hashmi S.S., Palma J.M., Corpas F.J. Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology. *Chemosphere*. 2022; 290: 133329. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133329>
8. Khan M.R., Adam V., Rizvi T.F., Zhang B., Ahamad F., Josko I., Zhu Y., Yang M., Mao C. Nanoparticle-plant interactions: two-way traffic. *Small*. 2019; 15(37): 1613–6810. <https://doi.org/10.1002/smll.201901794>
9. Palchoudhury S., Jungjohann K.L., Weerasena L., Arabshahi A., Gharge U., Albattah A., Miller J., Patel K., Holler R.A. Enhanced legume root growth with pre-soaking in α -Fe₂O₃ nanoparticle fertilizer. *RSC Advances*. 2018; 8(43): 24075–24083. <https://doi.org/10.1039/c8ra04680h>
10. Verma K.K., Song X.-P., Joshi A., Tian D.-D., Rajput V.D., Singh M., Arora J., Minkina T., Li Y.R. Recent trends in nano-fertilizers for sustainable agriculture under climate change for global food security. *Nanomaterials*. 2022; 12(1): 173. <https://doi.org/10.3390/nano12010173>
11. Vijayaraghavareddy P., Vemanna R.S., Yin X., Struik P.C., Makarla U., Sreeman S.M. Acquired traits contribute more to drought tolerance in wheat than in rice. *Plant Phenomics*. 2020(3):1–16. <https://doi.org/10.34133/2020/5905371>
12. Gavriš I.A., Lebedev S.V., Korotkova A.M., Kvan O.V. Influence of metal nanoparticles on the physiological and biochemical parameters of common wheat. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2019; 81(1):263–268. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-263-268> (In Russian)
13. Ehrhardt-Brocardo M.N.C., Coelho C.M.M., Souza C.A. Storage protein composition during germination and its association with physiological seed quality in common bean. *Acta Scientiarum – Agronomy*. 2022; 44(1):e53434. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53434>
14. Nazarian S., Majd A., Iranian S., Najafi F., Ghahremaninejad F., Landberg T., Greger M. Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. *Plant physiology and biochemistry*. 2017; 115: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.009>
15. Wang W., Peng H., Huang J., Cui K., Nie L. Effect of storage condition and duration on the detection of primed rice seed. *Front Plant Sci*. 2018; 172: 9–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00172>
16. Gong C., Wang L., Li X., Wang H., Jiang Y., Wang W. Responses of seed germination and shoot metabolic profiles of maize (*Zea mays* L.) to Y2O₃ nanoparticle stress. *RSC Advances*. 2019; 9(47): 27720–27731. <https://doi.org/10.1039/C9RA04672K>

ОБ АВТОРАХ:

Людмила Вячеславовна Галактионова,

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агроэкологии и почвоведения
Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. ул. 9 Января, 29, Оренбург, Оренбургская обл., 460000, Российская федерация
E-mail: anilova.osu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0781-3752>

Анастасия Михайловна Короткова,

кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз
Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. ул. 9 Января, 29, Оренбург, Оренбургская обл., 460000, Российская федерация
E-mail: anastasiaporv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7981-7245>

Надежда Алексеевна Терехова,

Аспирант, Оренбургский государственный университет, пр. Победы 13 е, Оренбург, Оренбургская обл 460018, Российская федерация
E-mail: terehova_n99@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0766-2600>

Надежда Ивановна Воскобулова,

Кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник отдела технологий зерновых и кормовых культур
Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. ул. 9 Января, 29, Оренбург, Оренбургская обл., 460000, Российская федерация
e-mail: voskobulova1952@yandex.ru

Святослав Валерьевич Лебедев,

доктор биологических наук, член-корреспондент, ведущий научный сотрудник, директор
Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. ул. 9 Января, 29, Оренбург, Оренбургская обл., 460000, Российская федерация
e-mail: lsv74@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

ABOUT THE AUTHORS:

Ludmila Vyacheslavovna Galaktionova,

Candidate of Biological Sciences, Researcher, Laboratory of Agroecology and Soil Science
Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences. st. January 9, 29, Orenburg, Orenburg region, 460000, Russian Federation
E-mail: anilova.osu@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0781-3752>

Anastasia Mikhailovna Korotkova,

Candidate of Biological Sciences, Researcher at the Laboratory of Biological Testing and Expertise
Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences. st. January 9, 29, Orenburg, Orenburg region, 460000, Russian Federation
E-mail: anastasiaporv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7981-7245>

Nadezhda Alekseevna Terekhova,

Graduate student, Orenburg State University, 13 e Pobedy Ave., Orenburg, Orenburg region 460018, Russian Federation
E-mail: terehova_n99@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0766-2600>

Nadezhda Ivanovna Voskobulova,

Candidate of Agricultural Sciences, Researcher at the Department of Grain and Forage Crops Technologies, Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences. st. January 9, 29, Orenburg, Orenburg region, 460000, Russian Federation
e-mail: voskobulova1952@yandex.ru

Svyatoslav Valerievich Lebedev,

Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member, Leading Researcher, Director
Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences. st. January 9, 29, Orenburg, Orenburg region, 460000, Russian Federation
e-mail: lsv74@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>