

ВЛИЯНИЕ МИКРОУДОБРЕНИЯ НАНОПЛАНТ-Ca-Si НА УРОЖАЙНОСТЬ И СОХРАЯЕМОСТЬ ПЛОДОВ ЯБЛОК

Е. В. ПОУХ, М. В. МАЦЕЮК

РУП «Брестская областная сельскохозяйственная опытная станция НАН Беларуси»,
г. Пружаны, Республика Беларусь, 224145, e-mail: elena.v.poukh@yandex.by

С. Г. АЗИЗБЕКЯН, А. Р. НАБИУЛЛИН, Ю. Н. БЕКИШ

ГНУ «Институт физико-органической химии НАН Беларуси»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220072, e-mail: s.az@mail.ru

(Поступила в редакцию 15.10.2024)

На двух сортах яблонь проведены полевые испытания нового белорусского микроудобрения Наноплант-Ca-Si на основе наночастиц Ca, Si, B, Fe. Особые свойства сверхпроницаемости наночастиц через клеточные стенки и защитные мембраны открывают возможность достижения высокой биологической эффективности при меньшем в десятки раз расходе действующих веществ в сравнении с традиционными соевыми и хелатными микроудобрениями. На сорте Белорусское сладкое микроудобрение Наноплант-Ca-Si обеспечило повышение урожайности относительно Фона на 34 %, что в 2 раза превысило показатели одновременно испытанных трех европейских кальциевых микроудобрений. На 17–23 % увеличилась средняя масса одного плода. Повышение усвояемости Ca обеспечило высокую степень упрочнения стенок клеток плодов и привело к улучшению параметров сохраняемости продукции – снизилось распространение побурения, гнили, ямчатости.

Низкий расход микроудобрения Наноплант Ca-Si, наряду с его невысокой стоимостью, позволяет увеличить кратность обработок, и, благодаря этому, удовлетворить постоянную потребность растений в Ca в период всего вегетационного сезона: от набухания почек до массового плодоношения.

Ключевые слова: яблоня культурная (*Malus domestica*), микроудобрение, Наноплант Ca-Si, наночастицы микроэлементов, урожайность, качество, сохраняемость плодов.

Field tests of the new Belarusian microfertilizer Nanoplant-Ca-Si based on nanoparticles of Ca, Si, B, Fe were conducted on two varieties of apple trees. The special properties of superpermeability of nanoparticles through cell walls and protective membranes open up the possibility of achieving high biological efficiency with a consumption of active substances tens of times lower compared to traditional salt and chelate microfertilizers. On the Belarusian Sweet variety, the microfertilizer Nanoplant-Ca-Si provided an increase in yield relative to the Background by 34 %, which is 2 times higher than the indicators of three simultaneously tested European calcium microfertilizers. The average weight of one fruit increased by 17–23 %. Increased digestibility of Ca provided a high degree of strengthening of the cell walls of the fruit and led to an improvement in the shelf life of the products – the spread of browning, rot, pitting decreased. Low consumption of microfertilizer Nanoplant Ca-Si, along with its low cost, allows to increase the frequency of treatments, and, thanks to this, to satisfy the constant need of plants for Ca during the entire vegetation season: from bud swelling to mass fruiting.

Key words: apple tree (*Malus domestica*), microfertilizer, Nanoplant Ca-Si, microelement nanoparticles, yield, quality, shelf life of fruits.

Введение

Решение проблемы значительного роста спроса на продовольствие в связи с растущим населением мира возможно лишь при переходе на инновационные технологии, способные изменить современную сельскохозяйственную практику. Новые возможности в повышении продуктивности растениеводства при одновременном радикальном снижении необходимых доз действующих веществ открывает использование нанотехнологий, которые по прогнозам специалистов [1–3] способны совершить в ближайшие десятилетия революцию в современных методах ведения сельского хозяйства. Размер наночастиц микроудобрений соизмерим с размером пор клеточных стенок и плазмодесм, что позволяет наноматериалам проявлять свойство сверхпроницаемости, высокой усвояемости и повышенной эффективности при очень малых расходах [4]. Наноудобрения уже производят в США, Индии, Иране, Бразилии, Испании, Турции и др. странах, где они начинают успешно применяться для повышения урожайности и качества продукции, стрессоустойчивости, сопротивления возбудителям заболеваний, снижения расходов макроудобрений и средств защиты [1].

В НАН Беларуси разработаны и освоены в промышленном производстве микроудобрения серии Наноплант на основе наночастиц элементов: Co, Mn, Cu, Fe, Zn, Cr, Mo, Se, B, S, Ca, Si [5–15]. Несколько марок Нанопланта с различным сочетанием элементов испытаны, зарегистрированы и широко применяются в операциях обработки семян, некорневой подкормки посевов на всех культурах растениеводства в Беларуси, экспортируются в Литву, Польшу, Узбекистан, Тайвань.

Природа защитила живые клетки от губительного влияния излишнего солевого фактора селективным «входным» фильтром – электрически заряженными липидными мембранами, пропускающими

лишь часть заряженных ионов солей. Наночастицы микроэлементов синтезируются в виде нерастворимых, не имеющих заряда, металлополимерных кластеров, стабилизированных биогенными полимерами, что позволяет им за счет наноразмера легко проникать во все органы растения и проявлять высокую эффективность, при меньших в десятки раз концентрациях элементов в рабочей жидкости, в сравнении с традиционными ионными микроудобрениями.

Актуальность перехода на препараты нового поколения вызвана мировой тенденцией замены старой модели ресурсоемкого развития на «зеленую» экономику, ориентированную на ресурсосбережение, экологизацию растениеводства, снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду, уменьшение «углеродного следа». Использование постепенно усваиваемых внутриклеточными ферментами биогенных полимеров-стабилизаторов коллоидов на основе наночастиц микроэлементов обеспечивает низкую токсичность [16, 17] и пролонгированность действия препарата. Разработанные в НАН Беларуси наноматериалы проявляют универсальную биологическую эффективность в отношении всех живых организмов, что открывает возможность их использования не только в виде микроудобрений, но и в качестве ветеринарных препаратов, кормовых добавок в животноводстве [18–20].

Одним из самых важных минеральных элементов, способствующих улучшению качества плодов, является кальций (*Ca*), образующий соединения с пектиновыми веществами клеточных стенок. Это увеличивает жесткость клеточных мембран, благодаря чему повышается устойчивость плодов и ягод к болезням, сохранность при транспортировке и хранении. Основой большинства кальциевых удобрений является нитрат кальция, содержащий азот, который стимулирует вегетативный рост зеленой массы, что нежелательно в фазах цветения и налива плодов и снижает влияние *Ca*. Для устранения этого недостатка, повышения продуктивности и сохранности плодов разработана, зарегистрирована и освоена в массовом производстве безазотная марка *Наноплант-Ca-Si*, объединяющая наночастицы соединений двух «строительных» элементов – *Ca* и *Si* (метабората кальция и силиката железа). Получены первые положительные результаты при испытаниях на яблонях и голубике [21].

Целью выполненных двухлетних полевых испытаний на яблонях явилось установление возможности применения *Наноплант-Ca-Si* для повышения урожайности и сохранности продукции при существенном снижении удельного расхода *Ca* в сравнении с популярными высокоэффективными кальциевыми микроудобрениями европейских производителей.

Основная часть

Полевые испытания на деревьях яблонь сортов *Белорусское сладкое* и *Имант* проведены в течение сезонов вегетации 2022 и 2023 гг. в опытном саду РУП «Брестская ОСХОС НАН Беларуси» Пружанского района. Схема размещения деревьев 4×2 м. Почва дерново-подзолистая, рыхлосупесчаная, мощность пахотного горизонта – 19 см, гумус – 2,04 %, pH_{KCl} – 4,86. Обеспеченность макро- и микроэлементами (мг/кг): *P* – 133; *K* – 234; *Ca* – 751; *Mg* – 153; *S* – 5,2; *B* – 0,59; *Cu* – 5,2; *Zn* – 4,2; *Mn* – 3,8. Внесение удобрений в конце 2021 года перед проведением опыта: *P* – 16 и *K* – 18 кг/га по д.в. Интегрированная защита в годы испытаний (с апреля по сентябрь) включала по 16 обработок средствами защиты. В течение вегетаций проводилось 3-кратное внесение в приствольные полосы гербицида Торнадо 540 (2 л/га) и 3-кратное подкашивание газона междурядий. Количество осадков и температура воздуха в ходе двухлетних испытаний незначительно отличалось от среднепогодных данных. Размер опытной делянки – 5 деревьев в 4-кратной повторности.

Варианты опыта:

1. Фон. Без применения обработок кальциевыми микроудобрениями.

Кальциевые микроудобрения европейских производителей:

2. Rosaliq (Ca,Mg,N+Me) (ROSIER S. A, Бельгия). Кальциевая селитра (нитрат кальция) с добавкой микроэлементов. Состав, г/л: *CaO* – 225; *N* – 150; *MgO* – 30; *B* – 0,75; *Cu* – 0,6; *Fe* – 0,75; *Mn* – 1,5; *Zn* – 0,3; *Mo* – 0,015. В соответствии с Инструкцией по применению произведено 3 некорневые обработки по 4 л/га. Общий расход ROSALIQ – 12 л/га. Расход *CaO* за сезон – **2700 г/га**.

3. Radix Cal (Састейнебл Агро Солюшнс, Испания). Состав, г/л: *CaO* – 150; органические кислоты – 163. В соответствии с Инструкцией по применению произведено 6 обработок (полив под корень) с расходом 5 л/га. Общий расход Radix Cal – 30 л/га. Расход *CaO* за сезон – **4500 л/га**.

4. Folcrop Ca-B (Састейнебл Агро Солюшнс, Испания). Хелат с лигносульфонатами. Состав, г/л: *CaO* – 104; *B* – 5,2; *SO₃* – 26. В соответствии с Инструкцией по применению произведено 6 некорневых обработок по 2,5 л/га. Общий расход Folcrop Ca-B – 15 л/га. Расход *CaO* за сезон – **1560 л/га**.

Белорусское микроудобрение:

5. Наноплант-Ca-Si – стабилизированный модифицированными полисахаридами коллоид на основе наночастиц соединений микроэлементов. Состав, г/л: *Ca* – 5,0; *Si* – 0,5; *B* – 1,0, *Fe* – 1,0.

Помимо *Ca* и *Si*, состав микроудобрения дополнен наночастицами *Fe* и *B*, который улучшает подвижность *Ca* в тканях, ускоряет образование, передвижение углеводов, улучшает фотосинтез, увеличивает содержание хлорофилла, способствует усилению роста пылевых трубок, повышает устойчивость к заболеваниям. *Fe* является необходимым элементом многих ферментов, участвует в важнейших биохимических процессах: в синтезе хлорофилла и ростовых веществ – ауксинов, метаболизме азота и серы, в дыхании клеток, их росте и делении.

В названиях существенной части присутствующих на мировом рынке удобрений приставка «нано» используется лишь в маркетинговых целях для препаратов, являющихся обычными солевыми, хелатными или гуминовыми удобрениями. Профессиональные производители наноматериалов должны соответствовать двум условиям:

1) предъявить доказательства в виде результатов измерений на соответствующих приборах о том, что материал представлен наночастицами;

2) продемонстрировать, что материал проявляет высокую биологическую эффективность при расходах действующих веществ, которые, как минимум на порядок ниже, чем у традиционно используемых препаратов.

Подтверждение наличия наночастиц в микроудобрении *Наноплант-Ca-Si* выполнено методом динамического рассеяния на лазерном анализаторе «Zetasizer Nano ZSP» (Malvern, Великобритания). Стандартный метод исследования коллоидов включает процедуру измерения с различной степенью разбавления пробы деионизированной водой (от 1/10 до 1/1000) и дополнительную обработку разбавленных растворов в ультразвуковом поле и лабораторной центрифуге.

На рисунке представлена диаграмма распределения гранулометрического состава, показывающая, что размер наночастиц в *Наноплант-Ca-Si* находится в диапазоне от 16 до 68 нм (средневзвешенный размер: 24–28 нм).

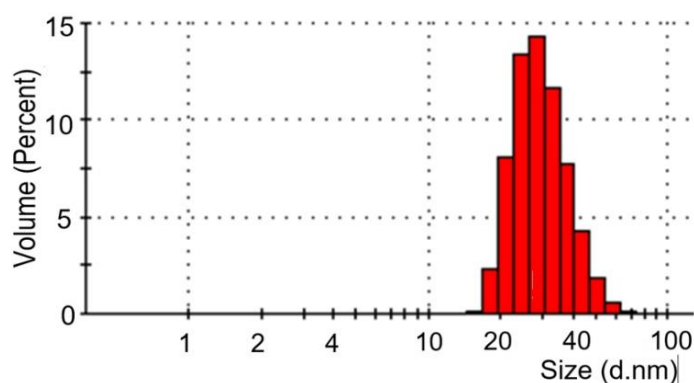


Рис. Диаграмма распределения наночастиц по размерам в микроудобрении *Наноплант-Ca-Si*

В течение сезона 2022 г. в период с 29 апреля по 23 августа проведено 13 некорневых обработок яблонь микроудобрением *Наноплант-Ca-Si* (совместно с плановыми обработками средствами защиты) с расходом микроудобрения 0,2 л / 100 л воды (1,6 л/га при расходе 800 л/га). Общий расход микроудобрения за сезон составил 20,8 л/га. Расход *Ca* (в пересчете на *CaO*) за сезон – **146 г/га**.

В первом сезоне испытаний на яблонях убедительно продемонстрировано выполнение второго условия принадлежности исследуемого препарата к классу наноматериалов (табл. 1). *Наноплант-Ca-Si* обеспечил достижение высокой биологической эффективности при общем расходе за сезон 146 г/га *CaO*, что в 10–30 раз ниже, чем у солевых и хелатных микроудобрений (1560–4500 г/га *CaO*).

В случае сорта яблони *Белорусское сладкое* микроудобрение *Наноплант Ca-Si* проявило достоверную и высокую эффективность в повышении урожайности не только относительно Фона (на 34,1 %), но и в отношении аналогов *Rosaliq (Ca,Mg,N+Me)*, *Radix Cal*, *Folcrop Ca-B*, которые обеспечили повышение урожайности лишь в пределах 6,5÷19,5 % (табл. 1). Уровень высокой урожайности яблок сорта *Имант* в Фоне (39,3 т/га) не сумело существенно изменить ни одно испытанное микроудобрение.

Применение микроудобрения *Наноплант Ca-Si* привело к стабильному увеличению относительно Фона важного показателя товарного качества – средней массы (М) 1 плода (на 17,2 % у *Белорусского сладкого* и на 23,1 % у сорта *Имант*).

Наночастицы *Ca* обеспечили высокую степень упрочнения стенок клеток плодов, что благоприятно отразилось на параметрах сохранности при хранении (2 месяца). Обработка яблонь *Наноплант-Ca-Si* в 28 раз относительно Фона снизила распространение побурения плодов сорта *Белорусское сладкое* – гораздо существеннее, чем европейские аналоги. В 4 раза снизилось распространение гнили у сорта *Белорусское сладкое* (с 0,4 до 0,1 кг) и в 8 раз сорта *Имант* (с 0,8 до 0,1 кг). В 2 раза относительно Фона снизилось распространение горькой ямчатости плодов сорта *Белорусское сладкое* (с 0,6 до 0,3 кг) и на 14 % у сорта *Имант*.

Таблица 1. Результаты испытаний урожайности, развития болезней и физиологических расстройств плодов яблони в период хранения в холодильной камере, 2022 г.

Вариант	Расход <i>CaO</i> , г/га	Урожай, т/га	Средняя масса плода, г	Побурение сердцевин, кг	Гниль, кг	Горькая ямчатость, кг
<i>Белорусское сладкое</i>						
Фон, Ф	–	23,1	116	5,7	0,4	0,6
<i>Rosalig</i>	2700	25,8	128*	1,1	0,2*	0,3*
<i>Radix Cal</i>	4500	24,6	133*	3,8	1,0	0,6
<i>Folcrop Ca-B</i>	1560	27,6	136*	4,9	0,1*	0,3*
<i>Наноплант-Ca-Si</i>	146	31,0*	136*	0,2	0,1*	0,3*
НСР _{0,05}		7,3	9,1	0,59	0,17	0,16
<i>Имант</i>						
Фон, Ф	–	39,3	121	0	0,8	1,5
<i>Rosalig</i>	2700	37,5	143*	0	0,4	1,2
<i>Radix Cal</i>	4500	39,8	151*	0	0,1*	2,6
<i>Folcrop Ca-B</i>	1560	36,9	139	0	0,9	1,4
<i>Наноплант-Ca-Si</i>	146	39,9	149*	0	0,1*	1,3
НСР _{0,05}		3,2	18,4		0,41	0,75

*– достоверное отклонение к контролю при $p < 0,05$.

Оценка окупаемости затрат на обработку яблонь испытанными микроудобрениями (выполненная в ценах сезона 2022 г.) показала, что экономическая эффективность использования микроудобрения *Наноплант-Ca-Si* в 1,5 раза выше, чем у лучшего испытанного европейского аналога (табл. 2).

Таблица 2. Окупаемость затрат на обработку яблонь сорта *Белорусское сладкое*

Вариант	Прибавка урожая относительно Фона, т/га	Затраты на некорневую подкормку, руб./га	Стоимость дополнительной продукции, руб./га	Окупаемость агроприема, руб./руб.
<i>Rosalig</i>	2,7	407,9	1350,0	3,30
<i>Radix Cal</i>	1,5	889,0	750,0	0,84
<i>Folcrop Ca-B</i>	4,5	589,0	2250,0	3,8
<i>Наноплант-Ca-Si</i>	7,9	678,4	3950,0	5,8

В ходе повторных испытаний микроудобрения *Наноплант-Ca-Si* в сезоне 2023 г. подтвердились результаты по увеличению средней массы одного плода, повышению урожайности и сохранности продукции (табл. 3).

Таблица 3. Результаты испытаний урожайности, развития болезней и физиологических расстройств плодов яблони в период хранения в холодильной камере, 2023 г.

Вариант	Масса М, 1 плода, г	Урожай			Здоровые плоды, %	Гниль, %	Горькая ямчатость, %
		кг/дерева	т/га	% к Ф			
Белорусское сладкое							
Фон, Ф	98	28,8	36,0	100	95,3	3,4	1,3
Наноплант-Са- Si	99	30,9*	38,6*	107*	96,9	1,9	1,2
НСР _{0,05}		1,7				0,2	0,1
Имант							
Фон, Ф	96	16,9	21,1	100	59,2	3,4	37,4
Наноплант-Са- Si	99	17,9*	22,4*	106*	91,6	2,3	6,1
НСР _{0,05}		0,6				0,2	0,9

*– достоверное отклонение к контролю при $p < 0,05$.

Особенно ярко эффективность обработки микроудобрением *Наноплант-Ca-Si* в сезоне 2023 г. проявилась на яблонях сорта *Имант*, и именно по тем показателям, которые напрямую зависят от степени усвояемости элемента *Ca* – процент присутствия здоровых плодов через 2 месяца хранения

был выше в сравнении с Фоном в 1,6 раза, распространение гнили снизилось в 1,5 раза, а распространение ямчатости – в 6 раз.

Выявленная в ходе испытаний микроудобрения *Наноплант Ca-Si* возможность обеспечения высокой биологической эффективности при снижении в десятки раз расхода действующих веществ подтверждает основные постулаты концепции использования наноматериалов в сельском хозяйстве «повышение урожайности и качества продукции при минимизации затрат на производство для максимизации выпуска» [22]. Средний размер наночастиц соединений элементов в *Наноплант-Ca-Si* составляет 24–28 нм, что сочетается с информацией исследователей о появлении эффекта сверхпроницаемости у наночастиц с размером менее 50 нм за счет возможности беспрепятственного проникновения через поры клеточных стенок и плазмодесмы [23–25].

Имеется информация об исследованиях эффективности применения в сельском хозяйстве отдельных наноматериалов с наночастицами *Ca* [26], *Si* [27–28], *B* [29], *Fe* [30]. Научная новизна представленных результатов состоит в том, что впервые было испытано действие препарата Наноплант Ca-Si на яблоне двух сортов. Микроудобрение, представленное стабилизированным коллоидом на основе композиции наночастиц соединений четырех необходимых растениям микроэлементов (*Ca*, *Si*, *B*, *Fe*), позволило улучшить качество яблок – сохранность и снижение потерь от побурения сердцевины плодов, горькой ямчатости и плодовых гнилей.

Заключение

При полевых испытаниях на яблоне двух сортов белорусской селекции *Белорусское сладкое* и *Имант* новое белорусское микроудобрение на основе наночастиц *Наноплант-Ca-Si* обеспечило повышение урожайности и сохранности продукции при общем расходе за сезон 146 г/га *CaO*, что в 10–30 раз ниже, чем у солевых и хелатных микроудобрений европейских производителей (1560–4500 г/га *CaO*). Такой эффект является следствием более высокой проницаемости и усвояемости наночастиц в сравнении с ионной формой элементов.

На сорте яблони *Белорусское сладкое* микроудобрение *Наноплант Ca-Si* проявило достоверную и высокую эффективность в повышении урожайности не только относительно Фона (на 34,1 %), но и в отношении аналогов *Rosalik (Ca, Mg, N+Me)*, *Radix Cal*, *Folcrop Ca-B*, которые обеспечили повышение урожайности лишь в пределах 6,5–9,5 %. Для испытанных сортов достигнуто стабильное увеличение важного показателя товарного качества – средней массы одного плода.

Установлено улучшение параметров сохранности продукции – у сорта *Белорусское сладкое* снизилось распространение побурения сердцевины плода в 28 раз, горькой ямчатости – в 2 раза, плодовых гнилей – в 4–8 раз, что является следствием высокой эффективности Наноплант-Ca-Si в обеспечении высокой степени упрочнения стенок клеток плодов.

По итогам испытаний 2022–2023 гг. микроудобрение *Наноплант-Ca-Si* зарегистрировано для применения на яблоне, а также на 13 других культурах. У аграриев появился еще один высокоэффективный помощник в решении задач повышения урожайности, товарного качества и сохранности продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mittal, D.; Kaur, G.; Singh, P.; Yadav, K.; Ali, S. A. Nanoparticle-Based Sustainable Agriculture and Food Science: Recent Advances and Future Outlook. *Front. Nanotechnol.* 2020, 2, 579954. <https://doi.org/10.3389/fnano.2020.579954>
2. Chen, H., and Yada, R. Nanotechnologies in agriculture: new tools for sustainable development. *Trends Food Sci. Tech.* 2011, 22, 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.09.004>.
3. Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., and Bartolucci, C. Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have? *Front. Environ. Sci.* 2016, 4:20 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>.
4. Ma, X., Geiser-Lee, J., Deng, Y., and Kolmakov, A. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Sci. Total. Environ.* 2010, 408, 3053–3061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.031>.
5. Разработка и испытания нанопрепаратов для агропромышленного комплекса Беларуси / С. Г. Азизбекян [и др.] // Сборник научных трудов «Химия и технология новых веществ и материалов». – Минск. Белорусская наука, 2014. – Вып. 4. – С. 109–121.
6. Наноплант – белорусский «эликсир урожайности» / С. Г. Азизбекян [и др.] // Белорусское сельское хозяйство. – 2015. – № 3 (Март). – С. 58–59.
7. Азизбекян, С. Г. Наноплант – новое отечественное микроудобрение / С. Г. Азизбекян, В. И. Домаш // Наше сельское хозяйство. – 2015. – № 7 (Апрель). – С. 68–71 (Начало) – № 9 (Май). – С. 38–41 (Окончание).
8. Влияние удобрений и роторегуляторов различной природы на рост и плодоношение черешни и вишни / Т. В. Рябцева [и др.] // Плодоводство: науч. тр. / РУП «Ин-т плодоводства»; редкол.: В.А. Самусь (гл. ред.) [и др.]. – Самохваловичи, 2016. – Т. 28. – С. 117–130.
9. Бруй, И. Г. Нанореволюция в агрохимии / И. Г. Бруй, С. Г. Азизбекян, В. И. Домаш // Белорусское сельское хозяйство – 2017. – № 3 март. – С. 51.
10. Бруй, И. Г. Нанозащита от стрессов / И. Г. Бруй, С. Г. Азизбекян, В. И. Домаш // Наше сельское хозяйство – 2018. – № 7. – С. 58–61.

11. Конопацкая, М. В. Эффективность применения микроудобрения Наноплант в защите картофеля от болезней / М. В. Конопацкая, В. И. Халаева, С. Г. Азизбекян // Биологически активные препараты для растениеводства. Материалы XIV Международной научно-практической конференции daRostim 2018. – Минск. БГУ, 2018. – С. 105–108.
12. Возделывание жимолости и голубики на рекультивируемых торфяниках низинного типа с использованием органических удобрений и микроэлементного стимулятора Наноплант / Ж. А. Рупасова [и др.]. – Минск, 2021. – 229 с.
13. Влияние пленкообразующих компонентов и микроэлементного стимулятора Наноплант при инкрустации семян моркови и свеклы столовой на биохимический состав корнеплодов / В. В. Опимах [и др.] // Овощеводство: сб. науч. Трудов / РУП Институт овощеводства. – Самохваловичи, 2022. – Т. 30. – С. 37–53.
14. Tamindžić, G. Comprehensive metal-based nanoprimer for improving seed germination and initial growth of field pea (*Pisum sativum* L.) / G. Tamindžić, S. Azizbekian, D. Miljaković and etc. // *Agronomy* – 2023, – 13(12), 2932. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122932>
15. Tamindžić, G. Assessment of Various Nanoprimings for Boosting Pea Germination and Early Growth in Both Optimal and Drought-Stressed Environments / G. Tamindžić, S. Azizbekian, D. Miljaković and etc. // *Plants* 2024, 13 (11), 1547. <https://doi.org/10.3390/plants13111547>.
16. Yurkevich E. Study of Toxicological Properties of Microfertilizers “Nanoplant” in Experiments in Vitro. S. / E. S. Yurkevich, M. V. Anisovich, S. G. Azizbekyan, In Proceedings of the 9th International Conference Bionanotox 2018 “Biomaterials and Nanobiomaterials”, Heraklion, Greece, 6–13 May 2018; pp. 23–25.
17. Vasilyeva, M. M. Study of the Toxicological Properties of Microfertilizers / M. M. Vasilyeva and etc. *Pub. Health Tox.* 2021, 1 (Suppl. 1), A46. <https://www.publichealthtoxicology.com/study-of-the-toxicological-properties-of-microfertilizers,142259,-0,2.html>.
18. Получение наночастиц биоэлементов с целью создания препарата для стимуляции гемопоэза у животных / С. Г. Азизбекян [и др.] // Нанотехника. – 2012. – № 4. – С. 71–72.
19. Козинец, А. И. Нанотехнологии в кормлении коров / А. И. Козинец, Т. Н. Козинец, С. Г. Азизбекян // Животноводство России. – 2020. – № 3. – С. 35–37.
20. Кравченко, А. Н. Микроэлементы в рационах подсвинков / А. Н. Кравченко, В. М. Голушко, С. Г. Азизбекян // Животноводство России. – 2020. – № 5. – С. 56–60.
21. Новое белорусское кальциевое микроудобрение для сохранности урожая / Е. В. Поух [и др.] // Наше сельское хозяйство. – 2023. – № 05. – С. 96–99.
22. Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., et al. Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities. *Sci. Total. Environ.* 2020. 721:137778. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137778>
23. Carlson, C., Hussain, S. M., Schrand, A. M., K. Braydich-Stolle, L., Hess, K. L., Jones, R. L., Schlager, J. J. Unique cellular interaction of silver nanoparticles: size-dependent generation of reactive oxygen species. *J. Phys. Chem. B* 2008. 112, 13608–13619. <https://doi:10.1021/jp712087m>
24. Dietz, K. J., and Herth, S. Plant nanotoxicology. *Trends. Plant. Sci.* 2011. 16, 582–589. <https://doi:10.1016/j.tplants.2011.08.003>
25. Wu, H., Santana, I., Dansie, J., and Giraldo, J. P. In vivo delivery of nanoparticles into plant leaves. *Curr. Protoc. Chem. Biol.* 2017. 9, 269–284. <https://doi:10.1002/cpch.29>
26. Hamza, M., Abbas M., Elrahman A., Helal M., Shahba M. Conventional versus Nano Calcium Forms on Peanut Production under Sandy Soil Conditions *Agriculture* 2021, 11, 767. <https://doi.org/10.3390/agriculture11080767>.
27. Rafi, M. M., Epstein, E., and Falk, R. H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Plant Physiol.* 1997. 151, 497–501. [https://doi:10.1016/s0176-1617\(97\)80017-x](https://doi:10.1016/s0176-1617(97)80017-x).
28. Rastogi, A., Tripathi, D. K., Yadav, S., Chauhan, D. K., and Živcák, M., Ğhorbanpour, M. et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3Biotech* 2019. 9:90. <https://doi:10.1007/s13205-019-1626-7>.
29. Dimkpa, C. O., Bindraban, P. S., Fugice, J., Agyin-Birikorang, S., Singh, U., and Hellums, D. Composite micronutrient nanoparticles and salts decrease drought stress in soybean. *Agro. Sustain. Dev.* 2017. 37:5. <https://doi:10.1007/s13593-016-0412-8>.
30. Cai, L., Cai, L., Jia, H., Liu, C., Wang, D., and Sun, X. Foliar exposure of Fe₃O₄ nanoparticles on *Nicotiana benthamiana*: evidence for nanoparticles uptake, plant growth promoter and defense response elicitor against plant virus. *J. Hazard. Mater.* 2020. 393:122415. <https://doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122415>.