

## Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-176-184>  
УДК: 635.713:631.559:628.9

Н.А. Семенова\*, Д.А. Захаров,  
Е.В. Степанова, С.Р. Саримова

Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова Российской  
академии наук (ИОФ РАН)  
119991, Россия, ГСП-1,  
г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

\*Автор для переписки: natalia.86@inbox.ru

**Финансирование.** Данное исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФ № 25-26-00361.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность коллегам Баймлеру Илье Владимировичу и Симакину Александру Владимировичу за предоставленные наночастицы и их характеристику.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** Захаров Д.А., Саримова С.Р.: проведение исследований, создание черновика рукописи. Степанова Е.В.: проведение исследований, верификация данных, формальный анализ. Семенова Н.А., Степанова Е.В.: методология, концептуализация. Семенова Н.А.: создание рукописи и её редактирование, администрирование данных.

**Для цитирования:** Семенова Н.А., Захаров Д.А., Степанова Е.В., Саримова С.Р. Применение наночастиц оксида магния для улучшения продуктивности базилика (*Ocimum basilicum* L.) в условиях полной светокультуры. *Овощи России*. 2025;(6):176-184. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-176-184>

**Поступила в редакцию:** 29.10.2025

**Принята к печати:** 05.12.2025

**Опубликована:** 18.12.2025

Natalia A. Semenova\*, Dmitriy A. Zakharov,  
Eugenia V. Stepanova, Sofia R. Sarimova

Prokhorov General Physics Institute  
of the Russian Academy of Sciences,  
38, Vavilova str., Moscow, GSP-1, Russia, 119991

\*Corresponding Author: natalia.86@inbox.ru

**Funding.** This work was supported by the Russian Science Foundation (No. 25-26-00361).

**Acknowledgments.** The authors are grateful to their colleagues Ilya Vladimirovich Baimler and Alexander Vladimirovich Simakin for providing the nanoparticles and their characterization.

**Authors' Contribution:** Zakharov D.A., Sarimova S.R.: investigation, writing – original draft. Stepanova E.V.: investigation, validation, formal analysis. Semenova N.A., Stepanova E.V.: methodology, conceptualization. Semenova N.A.: writing – review & editing, data curation.

**Conflict of interests.** The authors declare that there is no conflict of interest.

**For citations:** Semenova N.A., Zakharov D.A., Stepanova E.V., Sarimova S.R. Application of magnesium oxide nanoparticles to improve sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) productivity in total control environment agriculture. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(6):176-184. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-176-184>

**Received:** 29.10.2025

**Accepted for publication:** 05.12.2025

**Published:** 18.12.2025

# Применение наночастиц оксида магния для улучшения продуктивности базилика (*Ocimum basilicum* L.) в условиях полной светокультуры

Check for updates



## РЕЗЮМЕ

**Актуальность.** Рост спроса на пряные ароматические культуры способствует развитию их всевозможного производства в условиях полной светокультуры. При выращивании зеленных культур в контролируемых условиях наночастицы оксида магния (MgO-НЧ) имеют большой потенциал применения благодаря своей экологичности и способности стимулировать рост и накопление вторичных метаболитов. Данная работа посвящена определению эффективных концентраций MgO-НЧ для стимулирования роста, фотосинтеза и накопления эфирных масел базилика душистого.

**Материал и методы.** Наночастицы оксида Mg размером 6–7 нм, полученные методом лазерной абляции, применялись в виде 3-х внекорневых обработок, проведенных с интервалом 10 дней, начиная с фазы появления первых настоящих листьев у растений базилика душистого сорта Жиголо. Наночастицы использовали в концентрациях 25, 50, 75, 100, 150, 200 и 500 мг/л. Контрольные растения опрыскивали дистиллированной водой. На 60-й день культивирования измеряли: высоту растений, количество листьев, сырую и сухую массу, общее содержание хлорофилла, антоцианов, эфирных масел.

**Результаты.** Обработка базилика растворами наночастиц MgO в концентрациях 100 и 150 мг/л способствовала увеличению количества листьев на 65 и 60%, сырой массы растений на 55,7 и 83,4% соответственно. Обработки в концентрации 150 мг/л привели к увеличению высоты растений на 51,6%. Увеличение сухой массы растений наблюдали во всех вариантах обработок при использовании концентрации от 75 мг/л и более. С применением концентраций 150, 200 и 500 мг/л зафиксировано наибольшее достоверное увеличение сухой массы (на 43, 56 и 37%) и содержания общего хлорофилла (на 38, 77 и 33%). Наибольшее накопление эфирных масел (прирост более чем в 2 раза) происходило при обработке 50 мг/л. Изменялся также компонентный состав эфирных масел: наибольшее содержание линалоола отмечалось при 25 мг/л, эвгенола – при 50 мг/л, а эвкалиптола при 75 мг/л.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

внекорневая обработка, эфирные масла, антоцианы, хлорофилл, агрегатирование наночастиц

## Application of magnesium oxide nanoparticles to improve sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) productivity in total control environment agriculture

### ABSTRACT

**Relevance.** The rising demand for spicy crops is driving the development of their year-round production at urban farms. Magnesium oxide nanoparticles (MgO-NPs) have great potential for use in total control environment agriculture of green crops due to their eco-friendliness and ability to stimulate growth and secondary metabolite accumulation. This study aims to determine effective MgO-NPs concentrations for stimulating growth, photosynthesis, and essential oil accumulation in sweet basil.

**Materials and Methods.** MgO-NPs (6–7 nm in size), produced by laser ablation, were applied in three foliar applications, 10 days apart, beginning with the emergence of the first true leaves of sweet basil cultivar Zhigolo. Nanoparticles were used at concentrations of 25, 50, 75, 100, 150, 200, and 500 mg/l. Control plants were sprayed with distilled water. On the 60th day of cultivation, the following parameters were measured: plant height, leaf count, fresh and dry weight, total chlorophyll, anthocyanins, and essential oil content.

**Results.** MgO nanoparticle treatments at concentrations of 100 and 150 mg/l increased the number of leaves by 65 and 60%, and the fresh weight of basil plants by 55.7 and 83.4%, respectively. Treatment at concentration of 150 mg/l contributed to an increase in plant height by 51.6%. An increase in dry weight was observed in all treatment variants with MgO-NP concentrations 75 mg/l and above. When using treatments of 150, 200, and 500 mg/l, the greatest reliable increase in dry mass (by 43, 56, and 37%) and total chlorophyll content (by 38, 77, and 33%) was observed. Maximum accumulation of essential oils (more than 2 times) was observed at concentration of 50 mg/l. The composition of essential oils also altered: the highest content of linalool was observed at 25 mg/l, eugenol – at 50 mg/l, and eucalyptol – at 75 mg/l.

### KEYWORDS:

foliar treatment, essential oils, anthocyanins, chlorophyll, nanoparticle aggregation

## Введение

Последние десятилетия растет интерес потребителей к «натуральным» или «чистым» продуктам и натуральной медицине. В этом контексте особое место занимает свежая зелень, способная восполнить круглогодичную потребность человека в витаминах и минералах, благодаря развитию вертикального фермерства в полной светокультуре с применением светодиодных ламп. Объем мирового рынка вертикального фермерства в 2023 году оценивался в 7 млрд долларов [1]. Весомая доля рынка принадлежит листовым овощам и лекарственным культурам. Экстракты растений, содержащие эфирные масла, стали альтернативой синтетическим препаратам благодаря высокой антиоксидантной активности, а также антибактериальным, противогрибковым, противораковым, и другим полезным свойствам и, как правило, отсутствию резких побочных эффектов [2].

В частности, растения базилика (род *Ocimum* L.) приобрели огромную популярность для потребления в свежем виде, приготовления приправ, соусов, паст, чая, получения эфирных масел, вытяжек и пищевых добавок [3 – 5]. Листья базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) богаты флавоноидами, а также содержат в среднем до 20 компонентов эфирного масла [6], в том числе эвгенол и розмариновую кислоту, которые обеспечивают им антиоксидантные, противовоспалительные антибактериальные свойства. В зависимости от видовых и сортовых особенностей, а также от условий культивирования, компонентный состав эфирного масла базилика может существенно изменяться, однако обычно преобладающими компонентами являются эвгенол, линалоол, метилхавикол, метилциннамат, бергамотен [7]. Высокий спрос на листья базилика, обусловленный расширением направлений их использования, сделал эту культуру одной из самых перспективных в мировом сегменте свежих и сушеных трав: мировой рынок листьев в 2024 г. оценивался в 1,8 миллиарда долларов и увеличивается в среднем на 3,7% в год [8].

Основной проблемой выращивания базилика в вертикальных фермах в условиях полной светокультуры является более низкое накопление эфирных масел (в 10 раз и менее), чем в открытом грунте [8], и, соответственно, снижение качества получаемой продукции. Поэтому, для улучшения вкусовых свойств растений и накопления эфирных масел подбирают спектральный состав света, в том числе используют дополнительные световые обработки ультрафиолетовым излучением, внесение дополнительных питательных или стресс-провоцирующих веществ, способных стимулировать выработку вторичных метаболитов, к которым относятся в том числе эфирные масла. Установлено, что такие элементы как Mg, Ca, S, Fe, стимулируют выработку эфирных масел различных эфиромасличных культур. Эти элементы детектируются при анализе эфирных масел и клеток эпидермы – трихом, в которых накапливаются масла [10–12].

Как известно, магний играет ключевую роль в фотосинтезе, стимулирует накопление биомассы, регулирует синтез

аминокислот и клеточных белков, поглощение и миграцию фосфора, а также является стресс-протектором за счет стимуляции синтеза защитных веществ и укрепления клеточных стенок [13]. Роль магния для стимулирования выработки эфирных масел изучалась на разных культурах. Например, при подкормках мяты перечной в одних опытах, обработанные растения имели более высокий выход эфирного масла с изменением его компонентного состава (повышение содержания ментола и понижение ментона), наблюдалось также удлинение побегов, увеличение сухой массы листьев [14], в других опытах общее количество масел на единицу массы снижалось, но это компенсировалось повышением урожайности (увеличение количества листьев на 25–27%) [15].

Наночастицы магния (Mg-НЧ), являются перспективными в отношении стимулирования синтеза эфирных масел, так как провоцируют небольшой стресс за счет образования активных форм кислорода, которые активируют ферментативные и не ферментативные механизмы антиоксидантной защиты, в том числе повышают синтез вторичных метаболитов [16]. Применение подкормок в виде наночастиц, размер которых находится в диапазоне от 1 до 100 нм, улучшает такие их свойства, как адсорбция ионов, диффузия, ионообмен и комплексообразование [17]. Наиболее эффективными для сельскохозяйственных культур считаются сферические Mg-НЧ размером 3,5–2000 нм в концентрациях 0,15–20 000 мг/л [18]. Однако распространено мнение, что использование наночастиц оксидов металлов опасно для окружающей среды и здоровья человека [19], в том числе высокие концентрации наночастиц оксида магния MgO-НЧ (более 500 мг/л) могут вызывать повреждение ДНК различных тканей млекопитающих [20], а меньшие концентрации (до 100 мг/л) оказывают антиоксидантное, антиапоптотическое и антидиабетическое действие [21]. Считается, что в пределах допустимых концентраций MgO-НЧ обладают широкими перспективами применения благодаря своей экологичности [22]. Так, для стимулирования роста растений *Moringa oleifera* Lam., применяли MgO-НЧ (5–16 нм), полученные с помощью биосинтеза с использованием фильтрата *Trichoderma viride*, количество листьев растений возрастало в 2 и более раз при применении всех концентраций (40, 50 и 60 мг/л), сырая масса растений возрастала на 18–62% [23]. Mg-НЧ применяются в различных отраслях промышленности, проведены единичные исследования на тему их применения в сельском хозяйстве открытого грунта [23–25], а для выращивания пряно-ароматических культур в условиях полной светокультуры проводятся впервые.

Целью исследования было выявление перспектив использования MgO-НЧ в безопасном диапазоне концентраций для внекорневой обработки растений базилика сорта Жиголо для повышения вкусовых качеств и стимулирования выработки эфирных масел в условиях гидропонного выращивания в полной светокультуре.

## Материалы и методы

Опыты проводили в центре Биофотоники института общей

физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) в 2025 году.

### **Объекты исследований**

Изучали влияние наночастиц оксида магния (MgO-НЧ) на показатели роста и продуктивности базилика душистого (*Ocimum basilicum* L.) сорта Жиголо (Гавриш, Россия).

Сорт Жиголо имеет гвоздично-перечный аромат, фиолетовые яйцевидные листья без опушения, соцветия, 15–19 см длиной, и розовые цветки. Высота растений составляет в среднем 31–42 см, от полных всходов до уборки на зелень проходит 47–51 день, до цветения – 65–72 дня. Урожайность 1,0–1,1 кг/м<sup>2</sup>. Подходит для культивирования в гидропонных условиях.

Растения базилика Жиголо выращивали в фитокомнате при контролируемых условиях полной светокультуры с использованием светодиодных ламп СФ60БК-1000 (Светолуб, Россия) с плотностью фотосинтетического потока фотонов 240±10 мкмоль м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> при 16-часовом фотопериоде. Температура поддерживалась в режиме день/ночь – 24/20±1°C и относительной влажности воздуха 65±5%. В качестве субстрата для выращивания использовали кубики минеральной ваты (Grodan, Польша), которые погружали в лотки для питания и орошения способом подтопления. Для приготовления питательного раствора использовался трехкомпонентный гидропонный состав Terra Aquatica (Франция) для базилика.

Наночастицы оксида магния (MgO-НЧ) были получены в центре Биофотоники ИОФ РАН методом лазерной абляции в жидкости твердой металлической мишени Mg. В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду. В качестве источника лазерного излучения использовали Nd:YAG лазер NL300 (Ekspla, Вильнюс, Литва). Общая продолжительность лазерной абляции составляла 2 ч. ζ-потенциал полученного коллоида MgO-НЧ составлял -9 мВ (меньше 10 мВ), что говорит о нестабильности полученных НЧ [26] и присутствию в коллоиде крупных агрегатов. С помощью атомно-силового микроскопа NPX200 (Seiko, Япония) было установлено, что большая часть MgO-НЧ имела размер 6–7 нм, присутствовали отдельные наночастицы с размерами до 20 нм. Поэтому непосредственно перед каждой обработкой раствор MgO-НЧ помещали на 30 минут в ультразвуковую ванну (RS, Англия) для устранения агрегатирования.

### **Проведение обработок и измерений**

Для определения эффективных концентраций применения внекорневых обработок растений базилика коллоидным раствором MgO-НЧ в диапазоне концентраций: 25, 50, 75, 100, 150, 200 и 500 мг/л. Контрольные растения опрыскивали дистиллированной водой. Обработку проводили в фазу появления 2-х настоящих листьев, а затем повторяли еще 2 раза с интервалом 10 дней.

Измерения проводились на 60-й день культивирования в фазу начала цветения, когда накопление эфирных масел в

растении увеличивалось [27]. Учитывали такие показатели как высота растений, количество листьев, сырая и сухая массы, содержание пигментов и эфирных масел.

### **Измерение биометрических показателей, пигментов, количественный и компонентный анализ эфирных масел, микроскопия листьев**

Высоту растений измеряли с помощью линейки. Значения показателя свежей и сухой массы растений получали путем взвешивания с использованием весов АРТВ 457В (Amput, КНР). Для получения сухой навески растения высушивали в сушильном шкафу ШС-40-02 (Мир оборудования, Россия) до постоянной массы в течение 6 часов при температуре 70°C. Затем определяли процент сухого вещества в общей массе, для чего сухую массу делили на сырую массу и умножали на 100%. Оценка биометрических показателей необходима в том числе и для расчета выхода эфирных масел на единицу собранной свежей массы и на 1 растение.

Общий хлорофилл измеряли неинвазивным методом с помощью хлорофиллометра Hansatech CL-01 (Hansatech Instruments, Великобритания).

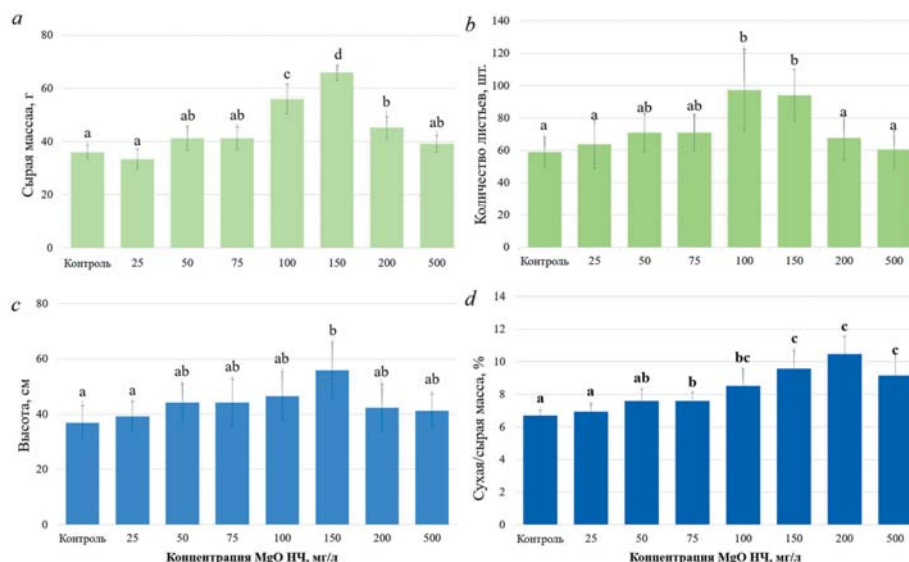
Для получения вытяжки антоцианов отбирали навеску листьев 0,3 г, затем также растирали с добавлением 1%-ной соляной кислоты, после чего экстракт помещали на 15 мин в водяную баню (44–45°C) и фильтровали. Содержание антоцианов измеряли на спектрофотометре Cintra 4040 (GBC Scientific Equipment Pty Ltd, Австралия), при длине волны 510 нм, итоговые значения (в мг на 100 г сырой массы) рассчитывали по показателю поглощения цианидин-3,5-дигликозида в 1%-ном растворе соляной кислоты [28].

Микроскопия листьев контрольных растений и при концентрациях 75 и 200 мг/л с целью обнаружения скопления наночастиц на их поверхности проводили после последней обработки растений с использованием универсального оптического микроскопа A13 0901NRT (ООО "Эрствак", Россия).

Экстракцию эфирных масел проводили гексаном (99,8%), по ранее описанной методике [29]. Общее количество эфирных масел определяли с помощью газового хроматографа с пламенно-ионизационным детектором "Хроматэк-Кристалл 5000" (Хроматэк, Россия). Объем экстракта, равный 1 мкл, вводили в режиме без разделения потока в хроматограф с капиллярной колонкой ВР-1 (60 м × 0,25 мм) и программным обеспечением Хроматэк Аналитик v3.0.0.2. В качестве газоносителя использовали азот. Температура инжектора составляла 200°C, температура линии передачи и детектора – 250°C. Температурный градиент увеличивался со скоростью 2°C в минуту от 70°C до 220°C. Общее время анализа одной пробы составляло 85 минут. После получения данных производили пересчет на 1 г свежей массы.

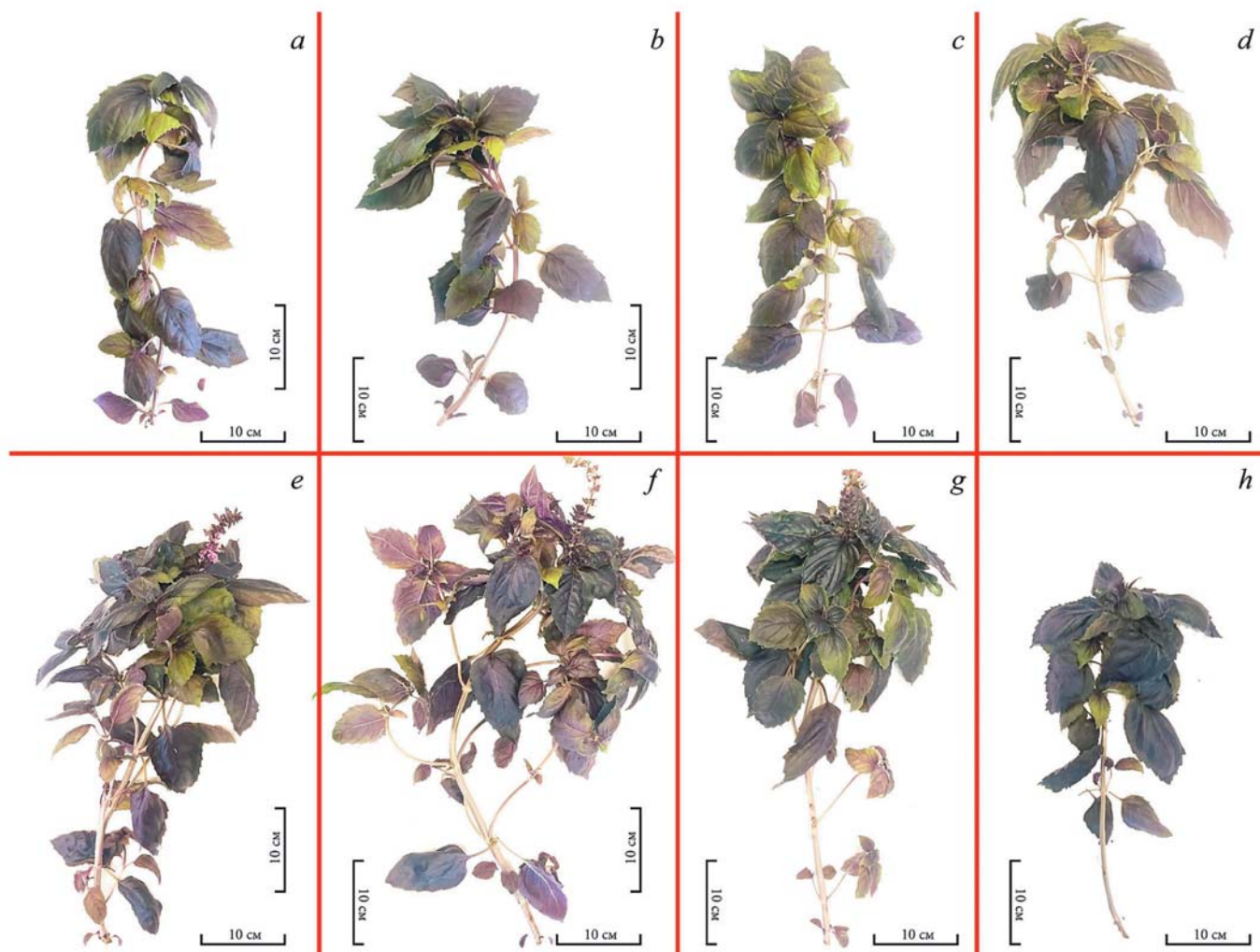
### **Статистический анализ данных**

Для оценки статистической достоверности результатов (p<0,05) использовали F-критерий. Статистическую обработку данных и построение графиков проводили в MS Excel 2022



**Рис. 1. Показатели роста растений базилика сорта Жиголо при внекорневой обработке MgO-НЧ:** а – сырая масса (г); б – количество листьев на одном растении (шт); в – высота растений (см); г – отношение сухой массы к сырой (% в одном растении); представленные столбцы отображают средние значения, а вертикальные планки указывают на стандартные погрешности (n=10) с значимыми различиями  $p \leq 0,05$ ; проставленные буквенные индексы у столбцов характеризуют значимые различия между группами, начиная с минимального значения а

**Fig. 1. Growth parameters of Zhigolo basil plants after foliar treatment with MgO-NPs:** a – fresh weight (g); b – number of leaves per plant (pcs); в – plant height (cm); г – ratio of dry weight to fresh weight (% per plant); the presented columns show the mean values, and the vertical bars indicate the standard errors (n = 10) with significant differences  $p \leq 0.05$ ; the letter indices next to the columns characterize significant differences between the groups, starting from the minimum value a



**Рис. 2. Внешний вид растений на 60-й день культивирования по вариантам опыта:** (а) контроль без обработки; остальные варианты – с обработкой растворами MgO-НЧ в следующих концентрациях: (б) 25 мг/л, (в) 50 мг/л, (г) 75 мг/л, (д) 100 мг/л, (е) 150 мг/л, (ф) 200 мг/л и (з) 500 мг/л

**Fig. 2. Appearance of plants on the 60th day of cultivation according to the experimental variants:** (a) control without treatment; and with MgO-NP treatment solutions at concentrations of (b) 25 mg/l, (c) 50 mg/l, (d) 75 mg/l, (e) 100 mg/l, (f) 150 mg/l, (g) 200 mg/l and (h) 500 mg/l

и OriginLab 2022. Эксперимент проводили в трёхкратной повторности.

### Результаты и обсуждение

#### Биометрические показатели

Для определения интенсивности роста и накопления питательных веществ при различных концентрациях MgO-НЧ на 60-й день вегетации измеряли биометрические показатели (см. рис. 1). Результаты исследований, полученные на 60 сутки культивирования опытных растений базилика сорта Живаго, показали преимущество обработок растворами MgO-НЧ в вариантах концентрацией 100 и 150 мг/л. Обработка растворами MgO-НЧ в концентрации 150 мг/л оказывала достоверное стимулирующее действие, увеличивая высоту растений на 51,6% по сравнению с контрольной группой растений, высота которых составляла 36,8±2,6 см (рис. 1, с и 2 а). Концентрации 100 и 150 мг/л способствовали увеличению количества листьев на 65 и 60%, сырой массы растений на 55,7 и 83,4% соответственно (рис. 1 б, а) и стимулировали переход растений в генеративную фазу. Визуально растения вариантов были более развиты (рис. 2). У растений *Moringa oleifera* Lam., для стимулирования роста которых также применяли биосинтезированные MgO-НЧ (5–16 нм), также возрастало количество листьев растений в 2 и более раз при применении всех концентраций (40, 50 и 60 мг/л), сырая масса растений возрастала на 18–62%, однако другие концентрации в работе не рассматривались [23].

Схожие результаты были получены на культуре *P. vulgaris* в диапазоне концентраций от 50 до 100 мг/л [30]. Более высокие концентрации вызывали угнетение роста: при 200 и 500 мг/л высота снижалась более чем на 20%.

Существенные изменения сухой массы растений наблюдали во всех вариантах обработок при использовании концентраций MgO-НЧ от 75 мг/л (рис. 1d). Наибольшее накопление сухого вещества наблюдалось в вариантах с обработками 150, 200 и 500 мг/л, увеличение на 42,9, 56,3 и 36,5% соот-

ветственно. Увеличение сухой массы растений наблюдалось при применении MgO-НЧ у растений *M. oleifera* в работе Suliman A.A. и соавторов [23].

#### Содержание пигментов

Известно, что в условиях стресса, наночастицы имеют способность защищать фотосинтетический аппарат растений, повышать эффективность фотосинтеза, а также накапливать соответствующие гормоны и антиоксиданты, повышая их устойчивость [31]. На рисунке 3 представлена информация о содержании пигментов в опытных растениях базилика после проведенных обработок растворами MgO-НЧ в базилике сорта Жиголо в различных концентрациях на 60 день культивирования. В экспериментах Moynier F. и Fujii T. (2017) было достоверно установлено, что обработка листьев как обычным, так и наномагнием влияет на содержание хлорофилла [32]. Это подтверждено в наших исследованиях, где применение растворов MgO-НЧ в концентрациях 150, 200 и 500 мг/л приводило к увеличению его концентрации на 38, 77 и 33% соответственно. Однако применение концентраций до 100 мг/л практически не влияло на содержание общего хлорофилла.

Если сравнивать полученные нами результаты опытов с проведенными Delfani M. и соавторами (2017) на растениях *Vigna unguiculata* (L.) Walp. [25], процент повышения хлорофилла в нашем опыте был более значительным (на 100-150% против 4%). Эта разница, очевидно, зависела от выбранной концентрации, которая изначально была субтоксичной (500 мг/л) для растений *V. unguiculata*. Также это может быть связано с особенностями биохимической реакции изучаемого вида растений. Опыты, проведенные Gautam A. с соавторами (2023) на культуре горчицы (*Brassica juncea* L.), также подтверждают повышение концентраций пигментов при использовании высоких концентраций – 100-150 мг/л MgO-НЧ [24]. Более высокая концентрация MgO-НЧ (300 мг/л) при листовой обработке кориандра (*Coriandrum sativum* L.) повысило содержание общего хлорофилла на 31% [33].

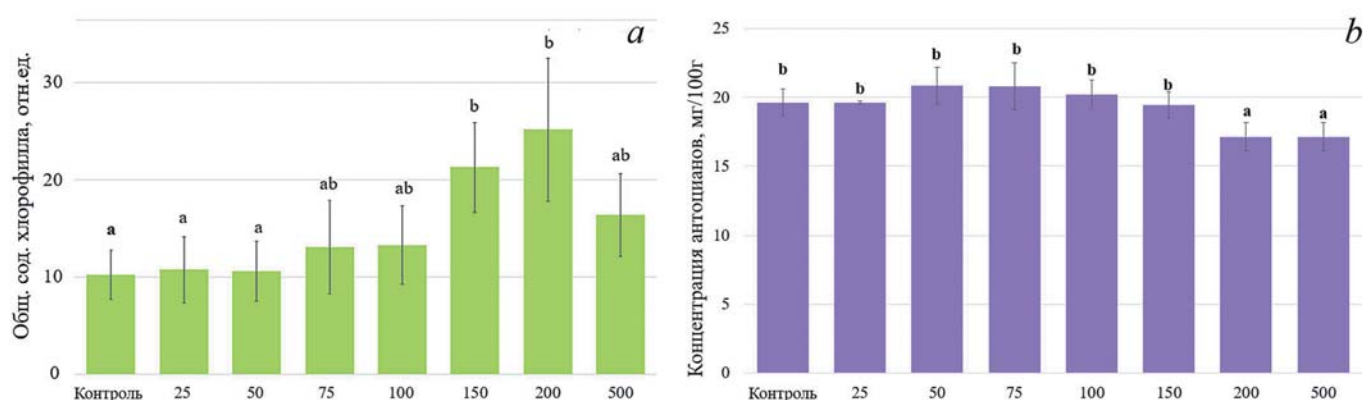
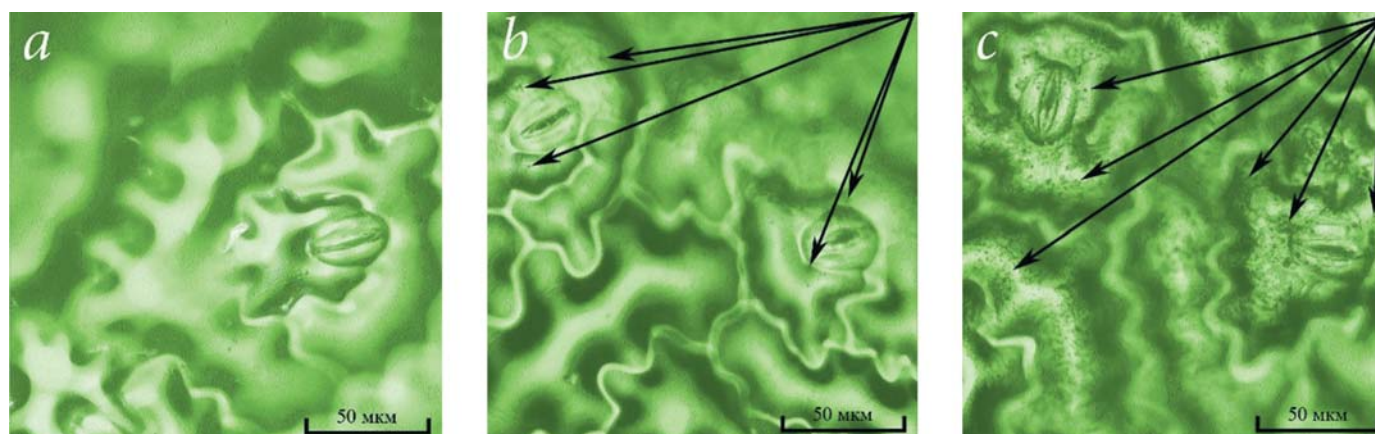


Рис. 3. Содержание пигментов растений базилика сорта Жиголо при внекорневой обработке MgO-НЧ: а – общий хлорофилл (условные единицы); б – содержание антоцианов (мг в 100 г сырого веса); представленные столбцы отображают средние значения, а вертикальные планки указывают на стандартные погрешности (n=10) с значимыми различиями  $p \leq 0,05$ ; представленные буквенные индексы у столбцов характеризуют значимые различия между группами, начиная с минимального значения а

Fig. 3. Pigment content of basil Zhigolo plants after foliar treatment with MgO-NPs: a – total chlorophyll (arbitrary units); b – anthocyanin content (mg per 100 g of fresh weight); the presented columns show the mean values, and the vertical bars indicate the standard deviations (n=10) with significant differences  $p \leq 0.05$ ; the letter indices next to the columns characterize significant differences between the groups, starting from the minimum value a



**Рис. 4.** Изображения поверхности листьев базилика сорта Жиголо (увеличение  $\times 50$ ) после третьей обработки листьев MgO-НЧ: а – контроль (вода), б – опрыскивание 75 мг/л, с – обработка 200 мг/л (стрелками показаны агрегаты наночастиц)  
**Fig. 4.** Images of the basil leaf surface of the Zhigolo variety (magnification  $\times 50$ ) after third treatment of leaves with MgO-NPs: a – control (water), b – treatment 75 mg/l, c – treatment 200 mg/l

Как известно, флавоноиды в растениях отвечают за снижение стресса, вызванного различными факторами [34-35]. В отличие от ранее проведенных исследований на культуре *S. Sativum*, где на 27% увеличилось количество флавоноидов при обработке 300 мг/л MgO-НЧ, в наших исследованиях не наблюдалось существенных изменений концентраций антоцианов, кроме вариантов с применением обработок 200 и 500 мг/л. Предположительно, данный эффект может быть связан со снижением стрессовой нагрузки на растения, что можно объяснить агрегатированием НЧ из-за их нестабильности. При использовании концентраций более 200 мг/л количество крупных агрегатов возрастает в разы, что подтверждается и результатами микроскопии листа (рис. 4). Поэтому для снижения агрегатирования лучше использовать растворы наночастиц в концентрациях до 200 мг/л.

#### Общее содержание эфирных масел

В контрольной группе в 1 грамме листьев базилика сорта

Жиголо содержалось около 0,19 мг эфирных масел (ЭМ), что при пересчёте на целое растение соответствует 6,65 мг или 0,27% ЭМ на сырую массу, что согласуется с другими исследованиями [36].

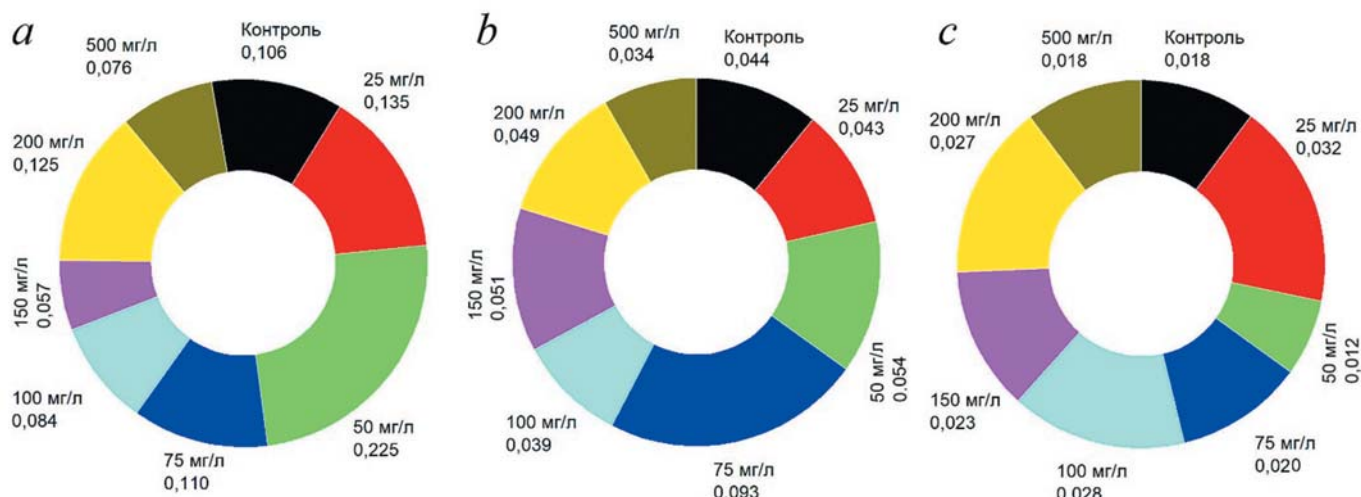
Опрыскивание MgO-НЧ в концентрации 25 мг/л статистически незначимо увеличило выход эфирных масел на 25% – до 0,231 мг/г, что составляет в среднем 7,7 мг с растения (см. табл. 1). Повышение концентрации до 50 мг/л увеличило выход ЭМ на 110% – до 0,389 мг/г и 16,02 мг с растения. Значительный прирост выхода ЭМ с растения связан со стимуляцией роста и накоплением биомассы в данном варианте (с 35,9 до 42,8 г).

Концентрация 75 мг/л повысила количество ЭМ на 27% – с 0,19 мг/г (6,65 мг с растения) до 0,24 мг/г (10,09 мг с растения). Повышение содержания эфирных масел статистически значимо, но меньше, чем при 50 мг/л, что указывает на превышение минимальной ингибирующей концентрации.

**Таблица 1.** Количественное содержание эфирных масел в базилике сорта Жиголо при внекорневой подкормке наночастицами магния  
**Table 1.** Essential oil content of basil cultivar Zhigolo after foliar application of Mg-NPs. Statistically significant differences are marked with different letters. Data are presented as mean  $\pm$  standard deviation

Концентрация MgO-НЧ, мг/л	Содержание ЭМ в листьях, мг/г	Суммарное содержание ЭМ в 1 растении, мг
0	0,185 $\pm$ 0,030 ab	6,65 $\pm$ 0,30a
25	0,231 $\pm$ 0,033b	7,70 $\pm$ 0,22b
50	0,389 $\pm$ 0,020c	16,02 $\pm$ 1,20d
75	0,235 $\pm$ 0,031b	10,09 $\pm$ 1,30c
100	0,160 $\pm$ 0,020a	8,94 $\pm$ 0,90c
150	0,138 $\pm$ 0,035a	9,08 $\pm$ 0,90c
200	0,214 $\pm$ 0,050ab	9,69 $\pm$ 0,80c
500	0,171 $\pm$ 0,010a	6,70 $\pm$ 0,40a

Статистически значимые различия отмечены буквами. Данные представлены в виде среднее  $\pm$  стандартное отклонение



**Рис. 5.** Содержание основных компонентов ЭМ (эвгенола – а, эвкалиптола – б, линалоола – с) мг/г сырой массы в базилике сорта Жиголо при опрыскивании MgO-НЧ в различных концентрациях  
**Fig. 5.** Content of the essential oil main components (eugenol – a, eucalyptol – b, linalool – c) in basil of the Zhigolo variety when sprayed with MgO-NPs in various concentrations

Подтверждением этого служит тот факт, что дальнейшее повышение концентрации до 100, 150 и 200 мг/л не увеличивало содержание ЭМ в листьях (0,130–0,214 мг/г), хотя их общее количество на растение продолжало расти за счёт увеличения сырой массы.

При максимальной концентрации наночастиц MgO (500 мг/л) содержание масел в листьях не отличалось от контроля и составляло 0,171 мг/г (6,7 мг на растение).

Таким образом, эффективными концентрациями для накопления эфирных масел являлись 25–75 мг/л. Обработки MgO-НЧ изменяли и компонентный состав эфирных масел. По составу основных компонентов данный сорт отличается преобладанием эвгенола. В контрольной группе в 1 грамме листьев содержание эвгенола составило 0,106 мг, эвкалиптола – 0,044 мг, линалоола – 0,018 мг. При обработке наночастицами MgO в концентрации 25 мг/л наблюдалось значительное повышение содержания: эвгенола – до 0,135 мг и линалоола – до 0,032 мг, тогда как содержание эвкалиптола оставалось на уровне контроля (0,043 мг). При концентрации 50 мг/л стимулирующий эффект усиливался: содержание эвгенола увеличивалось до 0,225 мг, эвкалиптола – до 0,054 мг, а линалоола, напротив, снижалось до 0,012 мг (рис. 5).

Повышение концентрации наночастицами MgO до 75 мг/л сопровождалось перераспределением состава: содержание эвгенола и линалоола снижалось до 0,11 и 0,02 мг соответственно, приближаясь к контрольным значениям, тогда как содержание эвкалиптола возрастало до 0,093 мг. В диапазоне 100–150 мг/л наблюдалась тенденция к снижению выработки масел, содержание эвгенола колебалось от 0,084 до 0,057 мг, эвкалиптол и линалоол демонстрировали увеличение 0,039–0,051 мг и 0,023–0,028 мг соответственно. При обработке MgO-НЧ в концентрации 200 мг/л зафиксировано увеличение содержания эвгенола до 0,125 мг и линалоола до 0,027 мг, тогда как содержание эвкалиптола сохранялось на уровне контрольной группы растений. При максимальной концентрации 500 мг/л содержание эвгенола и эвкалиптола

уменьшалось до 0,076 и 0,049 мг соответственно, линалоола – продолжало соответствовать уровню контрольных значений. Так как MgO-НЧ применялись на культуре базилика впервые, закономерностей их влияния на компонентный состав пока сложно выявить. Можно лишь утверждать, что, как и другие наночастицы [37–38], они вызывают изменение содержания отдельных компонентов масла базилика.

#### Заключение

Проведенные исследования демонстрируют, что пока для культуры базилика не существует идеального решения применения MgO-НЧ, так как одни концентрации (100–150 мг/л) способствуют активному росту растений, другие – активному фотосинтезу (150–200 мг/л), третьи – накоплению эфирных масел (25–75 мг/л), что пока не дает возможности растениям максимально раскрыть свой потенциал. Применение MgO-НЧ в качестве некорневых подкормок в концентрации 150 мг/л позволило значительно улучшить показатели роста растений, однако общее содержание эфирных масел существенно не изменилась по сравнению с контрольным вариантом. Наибольшее накопление эфирных масел в пересчете на одно растение наблюдалось при обработках концентрациями 50 и 75 мг/л. Использование MgO-НЧ способствует не только увеличению выработки эфирного масла, но и вызывает изменения содержания его отдельных компонентов, что отражает перераспределение метаболических потоков в растении, что дает возможность целенаправленно изменять ароматический профиль масла. Так, наибольшее количество эвгенола в листьях выявлено при варианте с обработкой MgO-НЧ в концентрации 50 мг/л (0,225 мг против 0,106 мг в контроле); эвкалиптола в варианте с обработкой в концентрации 75 мг/л (0,093 мг против 0,044 мг в контроле), линалоола – при 25 мг/л (0,032 мг против 0,018 мг в контроле).

Целесообразно в следующих экспериментах рассмотреть применение различных концентраций MgO-НЧ при измене-

нии их размеров, разнонаправлено влияющих на выработку эфирных масел. Провести исследования, направленные на увеличение стабильности MgO-НЧ. Комплексные многофакторные исследования необходимы для получения информации об эффективных способах стимулирования выработки продуктов вторичного метаболизма (масел, антиоксидантов и

тп.) под влиянием различных стрессоров и регулирования условий выращивания, в том числе освещения, для наиболее полной реализации потенциала продуктивности, а также изучения физиологических и биохимических откликов для наиболее глубокого понимания и прогнозирования требуемых характеристик готовой растительной продукции.

#### • Литература / References

1. Vertical Farming Market Outlook, 2029 [researchandmarkets.com] Research and Markets, 2025 [updated October 2024, cited September 30, 2025]. Available <https://www.researchandmarkets.com/reports/6061690/vertical-farming-market-outlook#src-pos-7>
2. Anwar F., Alkharfy K.M., Mehmood T., Bakht M.A., Najeeb-ur-Rehman. Variation in Chemical Composition and Effective Antibacterial Potential of *Ocimum basilicum* L. Essential Oil Harvested from Different Regions of Saudi Arabia. *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2021;55:187–193. <https://doi.org/10.1007/s11094-021-02384-2>
3. Karomatov I.D., Pulatov S.S. The medicinal properties of basil. *Biology and integrative medicine*. 2016;1:142-155. (In Russ.) <https://elibrary.ru/wjavrf>
4. Bakhmet M.P., Kas'yanov G.I. Prospects for producing food additives from the leaves and inflorescences of eugenol basil and common basil. *Izvestiya vuzov. Food technology*. 2021;5-6(383-384):67-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2021.5-6.13> <https://elibrary.ru/thpxpg>
5. Tkacheva T.A., Savchenko O.M. Morpho-biological features of holy basil in greenhouse conditions. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(4):108-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-4-108-113> <https://elibrary.ru/xhudra>
6. Sachyuka T.V., Kovalenko N.A., Supichenko G.N., Bosak V.N. Using indicators of the essential oils composition to identify the variety. *Vegetable crops of Russia*. 2019;(3):68-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-3-68-73> <https://elibrary.ru/dbsuao>
7. Zheljzakov V.D., Callahan A., Cantrell C.L. Yield and oil composition of 38 basil (*Ocimum basilicum* L.) accessions grown in Mississippi. *J Agric Food Chem*. 2008;56(1):241-5. <https://doi.org/10.1021/jf072447y>
8. Basil Leaves – Global Strategic Business Report [researchandmarkets.com] Research and Markets, 2025 [updated October 2025, cited September 30, 2025]. Available <https://www.researchandmarkets.com/reports/6094789/basil-leaves-global-strategic-business-report#tag-pos-2>
9. Semenova N.A., Chilingaryan N.O., Ivanitskikh A.S., Dorokhov A.A., Pavlova E.V., Uytova N.I. Influence of the spectral composition of light and silicon-containing fertilizer siliplant on the morphological parameters of basil in closed Artificial agroecosystems. *Bulletin of the Central Botanical Garden*. 2021;3:25-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.25791/BBGRAN.03.2021.1097> <https://elibrary.ru/nvfoid>
10. Buyisile M. Morphological and chemical composition of the essential oil of the leaf of *Schistostephium heptalobium*. *African journal of biotechnology*. 2009;8(8):1509-1519.
11. Paul B.K., Saleh-e-In M.M., Hassan S.M.M., Rahman M.Z., Saha G.C., Roy S.K. Chemical composition and biological activities of *Carum roxburghianum* Benth. (Radhuni) seeds of three Bangladeshi ecotypes. *Journal of essential oil bearing plants*. 2013;16(2):201-211. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2013.793983>
12. Er M., Tugay O., Ozcan M.M., Ulukus D., AL-Juhaimi F. Biochemical properties of some *Salvia* L. species. *Environmental monitoring and assessment*. 2013;185(6):5193-5198. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2935-z>
13. Ahmed N., Zhang B., Bozdar B., Chachar S., Rai M., Li J., Li Y., Hayat F., Chachar Z., Tu P. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1285512>
14. David E., Ortiz M., Marques M., Boaro C. Physiological indexes macro- and micronutrients in plant tissue and essential oil of *Mentha piperita* L. grown in nutrient solution with variation in N, P, K and Mg levels. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*. 2014;16(1):97-106. <https://doi.org/10.1590/S1516-05722014000100014>
15. Nemeth-Zaborine E., Szabo K., Rajhart P., Lelik L., Bernath J., Popp T. Effect of Nutrients on Drug Production and Essential Oil Content of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 2015;18(6):1508-1515. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.935040>
16. Lala S. Nanoparticles as elicitors and harvesters of economically important secondary metabolites in higher plants: A review. *IET nanobiotechnology*. 2021;15(1):28-57. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12005> PMID 34694730 PMCID PMC8675826
17. Currall S.C., King E.B., Lane N., Madera J., Turner S. What drives public acceptance of nanotechnology? *Nature Nanotechnology*. 2006;1:153-155. <https://doi.org/10.1038/nnano.2006.155>
18. Salas-Leiva J.S., Luna-Velasco A., Salas-Leiva, D.E. Use of magnesium nanomaterials in plants and crop pathogens. *Journal of Nanoparticle Research*. 2021;23: 267. DOI 10.1007/s11051-021-05337-8
19. Singh N., Manshian B., Jenkins G.J., Griffiths S.M., Williams P.M., Maffei T.G., Wright C.J., Doak S.H. NanoGenotoxicology: the DNA damaging potential of engineered nanomaterials. *Biomaterials*. 2009;30(23-24):3891-3914. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.04.009>
20. Mahmoud A., Ezgi Ö., Merve A., Özhan G. In Vitro Toxicological Assessment of Magnesium Oxide Nanoparticle Exposure in Several Mammalian Cell Types. *International Journal of Toxicology*. 2016;35(4):429-437. <https://doi.org/10.1177/1091581816648624>
21. Moeini-Nodeh S., Rahimifard M., Baeri M., Abdollahi M. Functional improvement in rats' pancreatic islets using magnesium oxide nanoparticles through antiapoptotic and antioxidant pathways. *Biological Trace Element Research*. 2017;175(1):146-155. <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0754-8>
22. Hornak J. Synthesis, Properties, and Selected Technical Applications of Magnesium Oxide Nanoparticles: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(23). <https://doi.org/10.3390/ijms222312752>

23. Suliman A.A., El-Dewiny C.Y., Soliman M.K.Y., Salem S.S. Investigation of the Effects of Applying Bio-Magnesium Oxide Nanoparticle Fertilizer to *Moringa Oleifera* Plants on the Chemical and Vegetative Properties of the Plants' leaves. *Biotechnology journal*. 2025;20(3):e202400536. <https://doi.org/10.1002/biot.202400536>
24. Gautam A., Sharma P., Ashokhan, S., Yaacob J.S., Kumar V., Guleria P. Magnesium oxide nanoparticles improved vegetative growth and enhanced productivity, biochemical potency and storage stability of harvested mustard seeds. *Environmental Research*. 2023;229:116023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116023>.
25. Delfani M., Firouzabadi M.B., Farrokhi N., Makarian H. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2014;45:530-540. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
26. Bhattacharjee S., DLS and zeta potential – What they are and what they are not? *Journal of controlled release*. 2016;235:337-351. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
27. Karamatova G.B., Safarov A.K., Ikramova Sh.Sh., Safarov K.S. Biological features of common basil (*Ocimum basilicum* L.) under various conditions of cultivation. *International research journal*. 2020;2(97):43-45. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.97.7.041> <https://elibrary.ru/htijmt>
28. Maslennikov P., Chupakhina G., Skrypnick L., Fedurayev P., Poltavskaya R. Content of anthocyanin and carotenoid pigments in medicinal plants. *Bulletin of Moscow Region State University*. 2013;1:6. <https://elibrary.ru/qzorvl>
29. Semenova N.A., Smirnov A.A., Ivanitskikh A.S., Izmailov A.Y., Dorokhov A.S., Proshkin Y.A., Yanykin D.V., Sarimov R.R., Gudkov S.V., Chilingaryan N.O. Impact of Ultraviolet Radiation on the Pigment Content and Essential Oil Accumulation in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Applied Sciences*. 2022;12:7190. <https://doi.org/10.3390/app12147190>
30. Amaya-Olivas N. I., Sánchez E., Hernández-Ochoa L., Ojeda-Barrios D. L., Ávila-Quezada G. D., Flores-Córdova M. A., Chávez-Flores D., Ayala-Soto J. G., Salcido-Martínez A., Ramírez-Estrada C. A. Biofortification with magnesium nanofertilizer on bioactive compounds and antioxidant capacity in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2023;51(1):12830. <https://doi.org/10.15835/nbha51112830>
31. Rasheed A., Li H., Tahir M.M., Mahmood A., Nawaz M., Shah A.N., Aslam M.T., Negm S., Moustafa M., Hassan M.U., Wu Z. The role of nanoparticles in plant biochemical, physiological, and molecular responses under drought stress: A review. *Front Plant Sci*. 2022;13:976179. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.976179>
32. Moynier F., Fujii T. Theoretical isotopic fractionation of magnesium between chlorophylls. *Scientific Reports*. 2017;7:6973. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07305-6>
33. Kaleem M., Shah A.A., Usman S., Xu W., Alsahli A.A. Magnesium Oxide Nanoparticles Improved Drought Resilience in *Coriandrum sativum* L. through Lifting Antioxidant Level, Redox Balancing, and Improving Photosynthetic Efficiency. *ACS Omega*. 2025;10(30):32813-32828. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00986>
34. Delfani M., Firouzabadi M.B., Farrokhi N., Makarian H.. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2014;45:530-540. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
35. Pandey M., Srivastava A.K., Suprasanna P., D'Souza S.F. Thiourea mediates alleviation of UV-B stress-induced damage in the Indian mustard (*Brassica juncea* L.). *Journal of Plant Interactions*. 2012;7:143–150.
36. Jan R., Asif S., Asaf S., Lubna, Khan Z., Kim K.-M. Unveiling the protective role of anthocyanin in rice: insights into drought-induced oxidative stress and metabolic regulation. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1397817. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397817>
37. Zheljazkov V.D., Cantrell C.L., Evans W.B., Ebelhar M.W., Coker C.E. Yield and Composition of *Ocimum basilicum* L. and *Ocimum sanctum* L. Grown at Four Locations. *Hortscience*. 2008;43:737-741. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.737>
38. Gohari G., Panahirad S., Mohammadi A, Kulak M., Dadpour M.R., Lighvan Z.M., Sharifi S., Eftekhari-Sis B, Szafert S., Fotopoulos V., Akbari A. Characterization of Octa-aminopropyl polyhedral oligomeric silsesquioxanes (OA-POSS) nanoparticles and their effect on sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) response to salinity stress. *Plant Physiol Biochem*. 2023;196:89-102. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.01.019>.
39. Nazir S., Jan H., Zaman G., Khan T., Ashraf H., Meer B., Zia M., Drouet S., Hano C., Abbasi B.H. Copper oxide (CuO) and manganese oxide (MnO) nanoparticles induced biomass accumulation, antioxidants biosynthesis and abiotic elicitation of bioactive compounds in callus cultures of *Ocimum basilicum* (Thai basil). *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. 2021;49(1):625-633. <https://doi.org/10.1080/21691401.2021.1984935>

#### Об авторах

**Наталья Александровна Семенова** – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, Центр «Биофотоника» ИОФ РАН <https://orcid.org/0000-0003-4132-7256>,

Scopus ID 57220058334, AAS-9393-2021,

SPIN-код: 9573-9253, автор для переписки, natalia.86@inbox.ru

**Дмитрий Алексеевич Захаров** – младший научный сотрудник Центра «Биофотоника» ИОФ РАН,

<https://orcid.org/0009-0005-7584-0295>,

Scopus ID: 58672963900,

Researcher ID JNR-9098-2023,

SPIN-код: 1483-3842, zaharov121221@mail.ru

**Евгения Вячеславовна Степанова** – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Центр «Биофотоника» ИОФ РАН

<https://orcid.org/0000-0002-3508-8642>,

Scopus ID: 7101888840,

Researcher ID E-9553-2014, SPIN-код: 4264-1029, jacky-st@yandex.ru

**Софья Руслановна Саримова** – лаборант,

Центр «Биофотоника» ИОФ РАН

<https://orcid.org/0009-0003-7614-1803> sofyasarimova@gmail.com

#### About the Authors

**Natalia A. Semenova** – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences <https://orcid.org/0000-0003-4132-7256>,

Scopus ID 57220058334, AAS-9393-2021,

SPIN-code: 9573-9253, Corresponding Author, natalia.86@inbox.ru

**Dmitry A. Zakharov** – Junior Researcher of Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<https://orcid.org/0009-0005-7584-0295>,

Scopus ID: 58672963900, Researcher ID JNR-9098-2023,

SPIN-code: 1483-3842, zaharov121221@mail.ru

**Evgenia V. Stepanova** – Cand. Sci. (Physical and Mathematical),

Senior Researcher, Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<https://orcid.org/0000-0002-3508-8642>, Scopus ID: 7101888840,

Researcher ID E-9553-2014, SPIN-code: 4264-1029, jacky-st@yandex.ru

**Sofya R. Sarimova** – Laboratory Assistant, Center "Biophotonics" of the General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<https://orcid.org/0009-0003-7614-1803>, sofyasarimova@gmail.com