УДК 631.81
DOI 10.5281/zenodo.17431068
Научная статья

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ НАНОЧАСТИЦ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И СОСТАВ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ У ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *O. BASILICUM*

MODERN CONCEPTS OF THE INFLUENCE OF NANOPARTICLES ON THE PRODUCTIVITY AND ESSENTIAL OIL COMPOSITION IN REPRESENTATIVES OF THE GENUS *O. BASILICUM*

ЗАХАРОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ,
инженер,
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии.

ZAHAROV DMITRI ALEKSEEVICH,
engineer,
Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences.

Накопленные данные показывают, что при фолиарном внесении наночастицы в умеренных дозах повышают процент и выход эфирных масел у Ocimum basilicum и ряда других эфирномасличных культур, что связывают с усилением фотосинтеза, питательного статуса и развитием железистых трихом. В обзоре систематизированы механизмы действия NPs: пути поступления (лист/корень), параметрическая зависимость (размер <50–100 нм, заряд, покрытие, доза), ROS–Ca^{2+}–MAPK-сигналинг и гормональный кросс-ток (JA/SA/ET/ABA), подпитка MEP/MVA-путей, а также молекулярные маркеры (активация GPPS, MR, MFS). Приведены примеры практических данных о влиянии наночастиц различных металлов на накопление эфирных масел и их профиль.

Accumulated evidence indicates that, when applied foliarly at moderate doses, nanoparticles increase the content and yield of essential oils in Ocimum basilicum and several other essential-oil crops—an effect attributed to enhanced photosynthesis, improved nutritional status, and the development of glandular trichomes. The review systematizes mechanisms of NP action: entry routes (leaf/root), parameter dependence (size <50–100 nm, surface charge, coating, dose), ROS–Ca^{2+}–MAPK signaling and hormonal crosstalk (JA/SA/ET/ABA), reinforcement of the MEP/MVA pathways, and molecular markers (activation of GPPS, MR, MFS). Practical examples are provided showing how nanoparticles of various metals affect essential-oil accumulation and compositional profiles.

Ключевые слова: *базилик, эфиромасличные культуры, наночастицы металлов, элиситоры, эфирные масла.*

Key words: *basil, essential oil crops, metal nanoparticles, elicitors, essential oils.*

Глобальный рынок эфирных масел (ЭМ) растёт, однако технологическая база их получения по-прежнему опирается на паро- и гидродистилляцию, на долю которой приходится более 90 % выпуска. Экономика процесса чувствительна к электрозатратам, длительности цикла и качеству утилизации тепла. Показано, что подбор режимов и энергоэффективная организация колонны (плотная укладка сырья, рекуперация, теплоизоляция)

одновременно повышают выход и снижают удельные энергозатраты, повышая маржу [10]. Вместе с тем валовая выручка в большей степени определяется стабильностью сырьевой базы (урожайность, масличность, хемиотип), которая существенно варьирует в зависимости от генотипа, условий среды и агротехники. Управляемые факторы (например, световое освещение в теплицах/вертикальных фермах) позволяют смещать как общий выход, так и композицию масла (линалоол/эвгенол и др.) за счёт изменения спектров и доз света [4], однако потенциал химико-биологических элиситоров для быстрых и воспроизводимых сдвигов вторичного метаболизма в полевых/производственных условиях реализован лишь частично. В последние годы накоплены данные, что наночастицы (в т. ч. оксиды Zn, Ti, Si, а также Cu, Ag) при фолярном внесении в средних дозах способны увеличивать общий выход масла и доли целевых компонентов у O. Basilicum и других эфиромасличных культур, что связывают с улучшением фотосинтетического аппарата и морфологии железистых трихом.

Цель данного обзора — обобщение и систематизация существующих данных о влиянии наночастиц на биосинтез и накопление эфирных масел в эфиромасличных культурах, в частности у O. Basilicum. В работе рассмотрены преимущественно зарубежные исследования, поскольку на момент подготовки обзора автором не были обнаружены отечественные публикации, посвящённые влиянию наночастиц на количественные и качественные характеристики эфирных масел.

Рассмотрим известные механизмы поступления наночастиц в ткани растения. После листовых обработок, наночастицы (NPs) проходят через кутикулу и/или устьица, далее перемещаются апопластным и симпластным путями, попадая в ксилему и зачастую перераспределяясь флоэмой. При почвенном внесении, вход — через ризодерму и корневые апопластные или симпластные тракты. Эффективность определяют размер (обычно <50–100 нм), заряд и поверхностные покрытия, а также состояние устьиц и культуры. Ответ растений на NPs жёстко зависит от химической природы (TiO_2, SiO_2, ZnO и др.), размера, заряда, покрытия, дозы и способа внесения (лист, корень, семена). При низких–умеренных дозах преобладают стимуляция и элиситация, при высоких — риск фотосинтетических нарушений, мембранных повреждений, генотоксичности [6]. Большинство работ сходится на том, что NPs вызывают генерацию активных форм кислорода (ROS) и вход Ca^{2+}, что активирует MAPK-каскады и меняет транскрипционные программы специализированного метаболизма (терпены, фенилпропаноиды). Эти сигналы перекрещиваются с фитогормонами (JA, SA, этилен, ABA, брассиностероиды), то есть NPs выступают в роли элиситоров. Умеренные дозы стимулируют метаболизм, избыток вызывает фитотоксичность (окислительный стресс, повреждения мембран, генотоксичность) [6]. Наночастицы оксидов (TiO_2, ZnO, SiO_2) и нано-удобрения часто повышают количество пигментов, эффективность фотохимии и питание (N, P, микроэлементы), тем самым увеличивая приток предшественников в MEP/MVA-пути (IPP/DMAPP) — источники моно- и сесквитерпенов эфирных масел. Показано: TiO_2-NPs улучшают фотосинтез, ферментативные антиоксиданты и одновременно повышают процент и выход ЭМ [1]. NPs помогают растениям легче переносить стресс, вызванный засолением, тяжелыми металлами и засухой. Это происходит потому, что они поддерживают баланс активных ROS и усиливают работу антиоксидантной системы. В результате данные процессы косвенно стабилизируют или даже усиливают биосинтез ЭМ. Для Dracocephalum moldavica TiO_2-NPs при контроле повышали процент ЭМ и модифицировали профиль (цитрали, гераниол), тогда как под солевым стрессом эффект на количество эфирных масел был слабее, но композиция смещалась — показатель регуляции как количества, так и состава. Похожие результаты упоминаются и в актуальных работах по TiO_2-NPs под стрессом кадмия [7].

Гландулярные (железистые) трихомы — основное место биосинтеза и депонирования ЭМ. Их инициацию и рост регулируют комплексы транскрипционных факторов: HD-ZIP IV и R2R3-MYB семейства MIXTA/MIXTA-like (модельные, родственные виды: Artemisia

annua, томат, Mentha). Это — ключевой регуляторный рычаг ёмкости биореакторов на поверхности листа [3].

В одном из исследований фиксируют рост плотности, размера пельтатных трихом и одновременное увеличение содержания и выхода ЭМ под действием TiO_2-NPs (наряду с улучшением фотосинтеза и антиоксидантной защиты) [1]. TiO_2-NPs повышают транскрипты ключевых генов пути ментола (включая GPPS, menthone reductase (MR), menthofuran synthase (MFS/MS)) и сопровождаются изменениями биохимических показателей листа — прямое молекулярное подтверждение элиситации терпенового пути наночастицами [14]. Комбинации NPs с метилжасмонатом (MeJA) и/или салициловой кислотой (SA) часто дают синергизм: TiO_2-NPs + MeJA/SA повышали антиоксидантные ферменты, фенольный пул и долю ментола в ЭМ, что указывает на гормональный кросс-ток в ответе на NPs и открывает путь к тонкой настройке хемотипа [11].

Самые убедительные на сегодня данные представлены в работе по священному базилику (Ocimum tenuiflorum, tulsi), где совместное внекорневое внесение диоксида кремния и диоксида титана (SiO_2 + TiO_2) дало синергичный эффект. При дозе Si100 + Ti100 мг/л через 120 дней после посадки авторы зафиксировали рост биомассовых показателей, увеличение площади и активности пельтатных железистых трихом (мест биосинтеза и хранения масла) и, — критически — подъём содержания эфирного масла на 172,4 % и его выхода на 323,1 % относительно контроля. GC-MS-анализ показал, что вместе с увеличением общего масла выросли и ключевые компоненты: содержание эвгенола в масле — на 43,3 %, а его выход на растение — на 151,3 %. Авторы увязывают эффект с улучшением фотосинтетики (хлорофилл, флуоресценция), активности нитратредуктазы, карбангидразы и укрупнением секреторных трихом [2]. Для культурного базилика (O. basilicum, «sweet basil») в полевых опытах показана эффективность агрономической схемы: цинк-оксидные и кремнезёмные наночастицы в сочетании с экстрактом пыльцы финика и частичной заменой NPK-удобрений. Наиболее результативный вариант ½ дозы NPK + 20 г/л экстракта + 2,0 г/л ZnO-NPs повышал процент эфирного масла на 45,71 % и 35,53 % (в двух сезонах) и увеличивал выход масла на растение более чем вдвое (≈ +113 % и +110 %). Менялась и структура масла (доли моно- и сесквитерпенов, кислородсодержащих фракций; среди мажоров авторы упоминают эстрагол, метилэвгенол, линалоол, 1,8-цинеол, кариофиллен), что подчёркивает: наночастицы выступали не только как стимуляторы биосинтеза, но и как регуляторы хемиотипа [5].

В полевом исследовании на тайском базилике (Вьетнам) оптимальные дозы Zn 10 мг/кг и Cu 5 мг/кг почвы максимизировали рост, урожай зелёной массы и выход ЭМ. При тех же дозах фиксировались наибольшие доли линалоола (≈ 41,6–53,3 %) и метилхавикола (≈ 22,5–37,6 %). Повышение уровней Zn и Cu сверх оптимума приводило к угнетению роста и снижению качества и выхода ЭМ, антимикробная активность масел оставалась высокой (MIC 25–100 мкг/мл), что подтверждает функциональную ценность сдвигов профиля. Таким образом, эффект дозы микроэлементов повышают биосинтез монотерпенов и фенилпропаноидов, а избыток — токсичен и ухудшает ароматический профиль [9].

В тепличном опыте с внекорневым внесением ZnO и Zn-NPs (0–100 мг/л) у зелёного базилика ростовые параметры, пигменты и доля ЭМ возрастали во всех цинксодержащих вариантах, причём нано форма оказывала более выраженный эффект, чем оксид. По ГХ-МС установлено 34 компонента с доминированием кислородсодержащих монотерпенов. Максимумы метилхавикола и α-кадинола достигались при 50 мг/л Zn-NPs, тогда как линалоол возрастал на фоне повышенной общей продуктивности при 50–100 мг/л. Эти данные указывают на чувствительность как количества ЭМ, так и её терпенового профиля к форме и дозе цинка [1].

В полевом опыте с опрыскиванием Fe2O3-NPs (0,50 и 100 мг/л) и ZnO-NPs (0,25 и 50 мг/л) содержание и выход ЭМ существенно росли: при 100 мг/л доля ЭМ достигала 1,48 %, а

выход — 33,09 мкл/раст., тогда как при 25 мг/л фиксировались наибольшие 1,42 % и 27,13 мкл/раст. Соответственно, взаимодействие Fe×Zn было значимым: максимальные ростовые параметры наблюдались при 100 Fe×50 Zn, а максимум по ЭМ — при 100 Fe×25 Zn. Это согласуется с функцией Fe в фотосинтезе, ферредоксин-опосредованных путях и ролью Zn в метаболизме углеводов, косвенно усиливающих терпеногенез [3].

Качественный сдвиг эфирного масла под влиянием железосодержащих нанокомплексов рассматривался в исследовании на O. Basilicum. Сравнивали Fe-нано-комплексы (с аминокислотами) и хелат Fe-EDDHA и обнаружили, что нано-формы значимо перестраивают профиль: увеличивают долю сесквитерпенов, уменьшают кислородсодержащие монотерпены, доминирующим компонентом при этом в ряде вариантов оставался фенилпропаноид эстрагол (53–89,5 %). На уровне биологической активности эфирные масла из растений, получавших Fe-нано-комплексы, демонстрировали более мощные антиоксидантные и антимикробные эффекты [12].

Помимо неорганических наночастиц, в литературе заметен слой работ по нано-формам регуляторов роста. Так, индолилуксусная кислота (IAA; O. tenuiflorum) повышала плотность и активность железистых трихом, усиливала ферментативные звенья метаболизма и увеличивала продукцию эфирного масла [8].

Использование нанокомплекса Zn–салициловая кислота (Zn–SA) сопровождалось усилением биологической и фармакологической активности ЭМ базилика, салициловая кислота известна как элиситор, активирующий антиоксидантную систему и сигнальные пути, а цинк — как микроэлемент, повышающий метаболическую активность. В совокупности это приводит к сдвигам в составе ЭМ в сторону компонентов с более выраженной антимикробной активностью и к приросту выхода [17].

Работа по нанокомплексу железа с мочевиной показала повышение суммарного содержания биологически активных соединений в ЭМ базилика и усиление антимикробно-антиоксидантных свойств масел относительно контроля. Авторы трактуют эффект как результат одновременно улучшенного азотного питания (мочевина) и роли наножелеза в окислительно-восстановительных процессах, опосредующих вторичный метаболизм [13; 16].

Применение наночастиц оксида серебра (Ag NPs) на сеянцах O. basilicum продемонстрировало выраженный стимулирующий эффект. При концентрации 100 мг/л наблюдалось увеличение содержания эфирных масел примерно в два раза — с 0,067 % до 0,132 %, а также повышение сырой массы растения с 91 до 142 г, что, в свою очередь, способствовало росту общего выхода эфирных масел с растения [8].

Наконец, для корректной интерпретации результатов важно помнить о методологических факторах, влияющих на состав и изменчивость ЭМ: хемиотипы O. basilicum варьируют по доминирующим соединениям (линалоол, эвгенол, эстрагол и др.), а аналитическая методика (GC-MS, условия экстракции/дистилляции) существенно влияет на итоговые проценты компонентов. Свежие обзоры и методические статьи подчёркивают эту вариабельность и необходимость стандартизации при сравнении разных опытов и сортов [15].

Если суммировать, во всех исследованиях проявляется единая закономерность: умеренные дозы наноэлементов или в комплексе с элиситорами улучшают физиологию и антиоксидантный статус растений, что транслируется в больший выход ЭМ или смещение состава в сторону целевых мажоров, а передозировки микроэлементов приводят к стрессу и деградации качества. Это создаёт как технологическое окно эффективности, так и потребность в стандартизации агроприемов под целевой хемиотип и требуемый профиль масел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aghaee A., Shahabivand S., Athari M., Nasiri Y. The effect of foliar application of zinc oxide

and zinc nanoparticles on growth, photosynthetic pigments and essential oil compounds of green basil // Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology). 2022. Т. 35, № 2. P. 233–245.

2. Ahmad B., Shabbir A., Jaleel H., Khan M. M. A., Sadiq Y. Efficacy of titanium dioxide nanoparticles in modulating photosynthesis, peltate glandular trichomes and essential oil production and quality in Mentha piperita L // Current Plant Biology. 2018. Т. 13. P. 6–15.

3. Al-Zyadi Q. Effect of iron or zinc nanoparticles on growth and essential oil content of basil (ocimum basilicum L.) // 2022. P. 3751–3754.

4. Bhat U. H., Uddin M., Chishti A. S., Singh S., Singh S., Khan M. M. A., Mukarram M. Enhancing growth, vitality, and aromatic richness: unveiling the dual magic of silicon dioxide and titanium dioxide nanoparticles in Ocimum tenuiflorum L // Frontiers in Plant Science. 2024. Т. Volume 15. 2024.

5. Chalvin C., Drevensek S., Dron M., Bendahmane A., Boualem A. Genetic Control of Glandular Trichome Development // Trends in Plant Science. 2020. Т. 25, № 5. P. 477–487.

6. Chu H. T., Vu T. N., Dinh T. T., Do P. T., Chu H. H., Tien T. Q., Tong Q. C., Nguyen M. H., Ha Q. T., Setzer W. N. Effects of Supplemental Light Spectra on the Composition, Production and Antimicrobial Activity of Ocimum basilicum L. Essential Oil // Molecules. 2022.

7. El-Mahrouk E.-S. M., Atef E. A., Gabr M. K., Aly M. A., Głowacka A., Ahmed M. A. A. Application of ZnO NPs, SiO2 NPs and Date Pollen Extract as Partial Substitutes to Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers for Sweet Basil Production // Plants. 2024.

8. Elbanna H. M., Ahmed O., Fayed S., Hammam K., Yousef R. S. The Biochemical Response of Ocimum basilicum cv. Grand Vert Plants to Silver Nanoparticles and Green Algae as Biofertilizer // Egyptian Journal of Chemistry. 2025. Т. 68, № 8. P. 97–111.

9. Gao M., Chang J., Wang Z., Zhang H., Wang T. Advances in transport and toxicity of nanoparticles in plants // Journal of Nanobiotechnology. 2023. Т. 21, № 1. P. 75.

10. Gohari G., Mohammadi A., Akbari A., Panahirad S., Dadpour M. R., Fotopoulos V., Kimura S. Titanium dioxide nanoparticles (TiO2 NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of Dracocephalum moldavica // Scientific Reports. 2020. Т. 10, № 1. P. 912.

11. Khan M. M. A., Quasar N., Afreen R. Nanotized form of indole acetic acid improve biochemical activities, the ultrastructure of glandular trichomes and essential oil production in Ocimum tenuiflorum L // Industrial Crops and Products. 2023. Т. 193. P. 116–117.

12. kılıç S., Önder S., Önder D., Kaya H., Sencan A. Morpho-Physiological Traces of Exogenous Biogenic Iron Oxide Nanoparticles in Basil Seedlings // BioResources. 2024. Т. 19. P. 4434–4454.

13. Machado C. A. T., Hodel K. V. S., Lepikson H. A., Machado B. A. S. Distillation of essential oils: An innovative technological approach focused on productivity, quality and sustainability // PLOS ONE. 2024. Т. 19, № 2.

14. Shenavaie Zare A., Ganjeali A., Vaezi Kakhki M. R., Cheniany M., Mashreghi M. Plant elicitation and TiO2 nanoparticles application as an effective strategy for improving the growth, biochemical properties, and essential oil of peppermint // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2022. Т. 28, № 7. P. 1391–1406.

15. Tavallali V., Kiani M., Hojati S. Iron nano-complexes and iron chelate improve biological activities of sweet basil (Ocimum basilicum L.) // Plant Physiol Biochem. 2019. Т. 144. P. 445–454.

16. Tavallali V., Rowshan V., Gholami H., Hojati S. Iron-urea nano-complex improves bioactive compounds in essential oils of Ocimum basilicum L // Scientia Horticulturae. 2020. Т. 265. P. 109–222.

17. Vahid Tavallali H. G., Omid Espargham. Biological and pharmacological activities of essential oils of Ocimum basilicum L. grown with Zn-salicylic acid nano-complex // Journal of Applied Botany and Food Quality. 2020. Т. 93.

18. Veleshkolaii F. R., Gerami M., Younesi-Melerdi E., Moshaei M. R., Ghanbari Hassan Kiadeh S. Studying the impact of titanium dioxide nanoparticles on the expression of pivotal genes related to menthol biosynthesis and certain biochemical parameters in peppermint plants (Mentha Piperita L.) // BMC Plant Biology. 2024. Т. 24, № 1. P. 531.

19. Wirtu S. F., Mishra A. K., Jule L. T., Ramaswamy K. Ocimum basilicum and Ocimum americanum: A Systematic Literature Review on Chemical Compositions and Antimicrobial Properties // Natural Product Communications. 2024. Т. 19, № 4. P. 193.

20. Yaldiz G., Camlica M., Ozen F. Biological value and chemical components of essential oils of sweet basil (Ocimum basilicum L.) grown with organic fertilization sources // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2019. Т. 99, № 4. P. 2005–2013.

Поступила в редакцию: 20.10.2025
Принята в печать: 25.11.2025

© Захаров Д. А., 2025.