

Обзор / Review

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-105-112>
УДК: 635.1/8:005.591.6(048)

А.В. Янченко, А.Ю. Федосов, М.И. Иванова,
А.М. Меньших, Е.В. Янченко*

Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО) 140153, Россия, Московская область, Раменский район, д. Верея, стр. 500

*Автор для переписки: elena_0881@mail.ru

Вклад авторов: Янченко А.В., Федосов А.Ю.: концептуализация, методология, верификация данных, создание рукописи и её редактирование, формальный анализ. Меньших А.М., Янченко Е.В.: руководство исследованием, концептуализация, методология, редактирование рукописи. Иванова М.И.: концептуализация, верификация данных, редактирование рукописи, формальный анализ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Янченко А.В., Федосов А.Ю., Иванова М.И., Меньших А.М., Янченко Е.В. Углеродные нанотрубки в овощеводстве (обзор). *Овощи России.* 2025;(6):105-112.

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-105-112>

Поступила в редакцию: 19.05.2025

Принята к печати: 26.08.2025

Опубликована: 18.12.2025

Alexey V. Yanchenko, Alexander Yu. Fedosov, Maria I. Ivanova, Alexander M. Menshikh, Elena V. Yanchenko*

All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center" p. 500, Vereya village, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia

*Corresponding Author: elena_0881@mail.ru

Authors' Contribution: Yanchenko A.V., Fedosov A.Yu.: conceptualization, methodology, data verification, writing – original draft, review & editing, formal analysis. Menshikh A.M., Yanchenko E.V.: supervision, conceptualization, methodology, writing – review & editing. Ivanova M.I.: conceptualization, validation, writing – review & editing, formal analysis.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citations: Yanchenko A.V., Fedosov A.Yu., Ivanova M.I., Menshikh A.M., Yanchenko E.V. Carbon nanotubes in vegetable growing (review). *Vegetable crops of Russia.* 2025;(6):105-112. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-105-112>

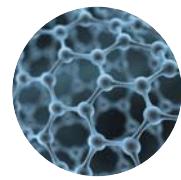
Received: 19.05.2025

Accepted for publication: 26.08.2025

Published: 18.12.2025

Углеродные нанотрубки в овощеводстве (обзор)





РЕЗЮМЕ

Актуальность. В данном обзоре рассматривается комплексное применение углеродных нанотрубок (УНТ) в овощеводстве. Освещаются различные аспекты их использования: от улучшения прорастания семян и стимуляции вегетативного роста до защиты растений в неблагоприятных условиях.

Результаты. Уникальной особенностью наноматериалов является их способность к интеллектуальной транспортировке активных веществ. Они точно доставляют удобрения, пестициды непосредственно к растению, высвобождая их в нужный момент. Такой подход позволяет создать идеальную систему питания растений, что приводит к существенному улучшению их развития, увеличению урожайности и повышению качества продукции. Особое внимание уделяется механизмам воздействия УНТ на растительные клетки, включая прямое взаимодействие с биомолекулами и косвенное влияние через регулирование окислительных процессов. Подчеркиваются перспективы применения УНТ для повышения эффективности водопользования в засушливых регионах.

Заключение. В присутствии избытка солей нанотрубки демонстрируют свои защитные свойства: они накапливаются в растительных тканях и усиливают функционирование а夸поринов. Это способствует более эффективному поглощению и транспортировке воды, снижая отрицательное воздействие солевого стресса на растения. Также обсуждаются существующие проблемы и потенциальные направления развития этой технологии в овощеводстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

овощеводство, наноматериалы, углеродные нанотрубки (УНТ), инновационный тип удобрений

Carbon nanotubes in vegetable growing (review)

ABSTRACT

Relevance. This review examines the comprehensive application of carbon nanotubes (CNTs) in vegetable growing. Various aspects of their use are highlighted, from improving seed germination and stimulating vegetative growth to protecting plants under adverse conditions.

Results. A unique feature of these nanomaterials is their ability to intelligently transport active substances. They precisely deliver fertilizers and pesticides directly to the plant, releasing them at the right time. This approach allows for the creation of an ideal plant nutrition system, which significantly improves plant development, increases yield, and enhances product quality. Particular attention is given to the mechanisms by which CNTs influence plant cells, including direct interactions with biomolecules and indirect influences through the regulation of oxidative processes.

Conclusion. The potential for using CNTs to improve water use efficiency in arid regions is highlighted. In the presence of excess salts, nanotubes demonstrate their protective properties: they accumulate in plant tissues and enhance the functioning of aquaporins. This promotes more efficient water absorption and transport, reducing the negative impact of salt stress on plants. The current challenges and potential development areas of this technology in vegetable growing are also discussed.

KEYWORDS:

vegetable growing, nanomaterials, carbon nanotubes (CNTs), innovative fertilizer

Введение

Многие развивающиеся страны остро нуждаются в решении проблемы продовольственной безопасности. Для этого в современном овощеводстве целесообразно применять нанотехнологии: они помогают увеличить урожайность и при этом снизить затраты на сельское хозяйство. Овощные хозяйства сегодня сталкиваются с комплексом вызовов: от климатических рисков и болезней растений до недостатка питательных веществ в грунте, снижения продуктивности и кадрового голода, а также пробелов в понимании генетической модификации культур. Инновационные инструменты на основе нанотехнологий, включая системы диагностики и борьбы с заболеваниями растений, применение наноцидов и экологически безопасных пестицидов, а также технологии равномерного распределения удобрений и микроэлементов способны значительно улучшить качество сельскохозяйственной продукции [1,2]. Изменение климата, проявляющееся в учащении таких экстремальных явлений, как засоление, засуха и температурные аномалии, ведет к значительному ежегодному снижению валовых показателей производства, урожайности и качества овощных культур в мировом масштабе [3]. Абиотические стрессы, особенно засуха и высокие температуры, становятся все более частыми и интенсивными в результате изменения климата, что приводит к значительным потерям урожая. Например, засуха и засоление почвы в высоких концентрациях, а также их вторичные эффекты, такие как осмотический, окислительный и ионный стресс, признаны основными препятствиями для сельскохозяйственного производства [4]. Кроме того, вредители и различные заболевания растений наносят серьезный удар по овощеводству, ежегодно приводя к потерям около трети урожая. Это становится главным препятствием на пути к обеспечению продовольственной безопасности населения планеты [2].

Революция в сельском хозяйстве может быть достигнута благодаря нанотехнологиям, которые способны трансформировать традиционные методы выращивания овощей в современную систему точного земледелия. Эта инновационная стратегия представляет собой умный подход к возделыванию овощей, основанный на постоянном мониторинге природных условий и автоматическом корректировании всех необходимых процессов в зависимости от изменений окружающей среды. По сути, это создание "умной" системы земледелия, которая подобно организму реагирует на внешние факторы, обеспечивая оптимальные условия для роста растений [5]. Разработка и внедрение элементов системы точного земледелия является актуальной задачей в сельском хозяйстве Российской Федерации [6].

Нанотехнологии открывают новые горизонты в сельском хозяйстве, позволяя одновременно увеличивать урожайность овощных культур и сохранять экологическое равновесие благодаря точечной доставке питательных веществ, умному контролю над распределением удобрений, минимизации потерь питательных элементов, созданию удобрений с программируемым высвобож-

дением и улучшению усвоения растениями труднодоступных веществ, что делает производство овощных культур более эффективным, устойчивым и экономически выгодным [7-9].

Технологический прогресс во многом зависит от разработки инновационных материалов, в особенности адаптивных и многофункциональных. Среди них перспективными являются новые наноматериалы, обладающие уникальными характеристиками – высокой прочностью, электропроводностью, значительной удельной поверхностью и биосовместимостью – углеродные нанотрубки (УНТ).

Благодаря своим уникальным размерам менее 100 нанометров, наноматериалы становятся передовым инструментом в революционном преобразовании сельского хозяйства. Малые размеры частиц позволяют им проникать в растительные ткани через корни и листья, создавая таким образом эффективную систему доставки удобрений и пестицидов [10]. В современном сельском хозяйстве наноматериалы демонстрируют впечатляющую эффективность благодаря своим уникальным свойствам. Их отличает огромная активная площадь поверхности, повышенная стабильность и наличие активных центров, что делает их гораздо более действенными по сравнению с обычными материалами.

Главная область их применения – «умные» наноудобрения, которые не только стимулируют рост и повышают урожайность растений, но и защищают их от болезней. Особую роль играют наносенсоры, позволяющие в реальном времени отслеживать состояние почвы и растений. Главное преимущество наноматериалов заключается в реализации контролируемой доставки активных веществ: они обеспечивают целенаправленный транспорт удобрений и пестицидов с последующим высвобождением в ответ на специфические физиологобиохимические потребности растения. Это позволяет оптимизировать питание растений, значительно улучшить их рост, повысить урожайность и качество получаемой продукции [11-13].

Взаимодействие растений с углеродными нанотрубками (УНТ) приводит к изменениям как во внешнем виде, так и в физиологических процессах растений. На степень этих изменений влияют различные факторы: размер и тип УНТ, их концентрация и растворимость, а также стадия развития и вид самого растения. Принцип проникновения УНТ в растение основан на соотношении их размера с порами в клеточной стенке. Для улучшения растворимости и усвоения нанотрубок растениями применяются специальные методы обработки: ультразвуковая резка в сочетании с химическим окислением и добавление карбоновых групп [14].

Углеродные нанотрубки (УНТ) оказывают комплексное положительное воздействие на развитие растений: в низких концентрациях они стимулируют прорастание семян и развитие рассады, повышают содержание хлорофилла и усиливают фотосинтез, а при засолении почвы защищают растения, улучшая работу их корневых систем. Механизм их влияния включает как прямое взаи-

модействие с клеточными компонентами (белками, факторами транскрипции и ДНК), так и косвенное воздействие через увеличение выработки оксида азота и активных форм кислорода, что в совокупности стимулирует вегетативный рост и помогает растениям эффективнее поглощать и использовать воду, особенно в засушливых условиях [15].

Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение нанотехнологий в сельское хозяйство сталкивается с рядом препятствий. Ключевыми проблемами являются необходимость тщательного изучения токсичности новых продуктов, ограниченность полевых исследований (в основном проводятся только лабораторные испытания), отсутствие четкой нормативной базы и высокие начальные затраты на производство.

Для преодоления этих барьеров требуется комплексный подход и совместные усилия всех заинтересованных сторон. В данном обзоре мы подробно рассмотрим актуальные примеры применения сельскохозяйственных нанотехнологий, основываясь на последних научных публикациях, и проанализируем перспективы развития этой области.

История применения и современные направления использования УНТ

Углеродные нанотрубки, появившиеся сравнительно недавно и получившие широкое признание только в последнее десятилетие, обладают выдающимися характеристиками, которые открывают новые перспективы для сельского хозяйства. Их уникальная структура, характеризующаяся огромной удельной поверхностью, минимальными размерами и высокой реакционной способностью, делает УНТ особенно перспективным материалом для агротехнологических инноваций. Эти свойства позволяют эффективно взаимодействовать с растительными клетками, влиять на их развитие и защитные механизмы, что создает основу для разработки новых методов повышения продуктивности сельскохозяйственных культур.

В ходе проведенных исследований было изучено влияние различных типов одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) на развитие корневой системы шести видов овощных культур: томата, лука, огурца, салата, капусты и моркови. Эксперимент проводили в контролируемых условиях: семена помещали в чашки Петри с ОУНТ и выращивали при температуре 25°C. Результаты показали разнонаправленное воздействие нанотрубок на разные культуры: нефункционализированные ОУНТ подавляли рост корней томата, но стимулировали развитие корневой системы лука и огурцов. При этом функционализированные ОУНТ негативно влияли на удлинение корней салата, тогда как на рост капусты и моркови оба типа ОУНТ не оказывали существенного воздействия. Результаты исследования свидетельствуют о видовой специфичности воздействия ОУНТ на растения, что определяет актуальность изучения их влияния на широкий спектр сельскохозяйственных культур [16].

УНТ демонстрируют уникальную способность проникать через клеточные стенки и мембранные растительных клеток, что открывает перспективы для создания интеллектуальных систем доставки веществ в растения. Исследования с использованием конфокальной флуоресцентной микроскопии подтвердили способность одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) проникать через клеточные структуры растений, что было показано при использовании конъюгатов ОУНТ с флуоресцеином изотиоцианатом и ДНК. Более того, ОУНТ способны транспортировать различные вещества к разным органеллам растительных клеток [17]. Дополнительно было обнаружено, что УНТ могут проникать через толстую оболочку семян, усиливая процесс их гидратации, что способствует ускоренному прорастанию семян и стимулирует ранний рост рассады [18].

Многочисленные исследования продемонстрировали широкий спектр положительного влияния углеродных нанотрубок на сельскохозяйственные культуры. УНТ на первых этапах исследований были приняты как эффективный стимулятор прорастания семян и роста растений, проявляющий также антибактериальные свойства, подавляя формирование микробных биопленок. Особенно впечатляющие результаты были получены в исследованиях, показавших способность УНТ увеличивать урожайность в два раза за счет модификации почвенной микробиоты. В условиях засоления нанотрубки проявляют защитные свойства: они накапливаются в растительных клетках и усиливают работу аквапоринов, что улучшает поглощение и транспортировку воды, снижая негативное воздействие солевого стресса [19].

Перспективным направлением применения УНТ является создание на их основе сенсорных систем и систем транспорта соединений, открывающих новые пути для точного контроля за развитием растений. Эти многофункциональные свойства делают углеродные нанотрубки привлекательным инструментом для решения различных задач современного растениеводства [20-21].

Все вышеперечисленные свойства позволяют применять их в следующих перспективных направлениях:

- Ускорение прорастания семян и стимуляция роста растений

Прорастание семян представляет собой критически важный и наиболее уязвимый этап в развитии растений, и применение нанотехнологий демонстрирует значительный потенциал в улучшении этого процесса. Обработка семян томата УНТ в концентрации 10-40 мкг/мл стимулировала ускоренное прорастание, что в дальнейшем положительно сказалось на развитии рассады и способствовало формированию более мощных растений.

Экспериментальные данные демонстрируют впечатляющие результаты: через 20 дней после обработки УНТ всхожесть семян томата составила 90%, что значительно превышает показатель контрольного варианта без обработки 71%. Кроме того, наблюдалось увеличение биомассы растений на 50%. Такой выраженный эффект

обусловлен способностью нанотрубок ускорять процесс поглощения воды семенами, что является ключевым фактором успешного прорастания.

Эти результаты указывают на перспективность использования УНТ как средства для оптимизации начального этапа развития растений, что может существенно повысить эффективность выращивания сельскохозяйственных культур [18].

Проведенные исследования показали, что углеродные нанотрубки (УНТ) оказывают различное влияние на прорастание семян разных культур при разных концентрациях. В экспериментах с томатом, луком, репой и редисом использовали концентрации УНТ: 10, 20 и 40 мг/л. Результаты продемонстрировали, что семена томата и лука более чувствительны к воздействию УНТ: их всхожесть значительно улучшалась при концентрациях 10-40 мг/л. В то же время семена редиса и репы показывали менее выраженную реакцию на присутствие нанотрубок. Эти данные указывают на видовую специфичность влияния УНТ на прорастание семян и необходимость подбора оптимальной концентрации нанотрубок для каждой конкретной культуры. Особенно перспективными выглядят результаты для томата и лука, что может быть использовано в практике выращивания этих культур [22].

Было выявлено, что концентрация 40 г/мл УНТ значительно усиливает усвоение питательных веществ растениями, что приводит к улучшению их роста и увеличению биомассы. Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) в концентрации 10-40 мг/л ускоряют прорастание семян перца за счет перфорации семенной оболочки. Кроме того, обработка ОУНТ демонстрируют более выраженное влияние на фотосинтетические процессы по сравнению с контрольными вариантами [23].

Другое исследование показало, что добавление ОУНТ усиливает рост рассады томата. Однако воздействие на рассаду томата ОУНТ в концентрации 50 мкг/мл значительно снизило содержание хлорофилла в листьях в 1,5 раза, а общая масса и высота системы корень/побег томата уменьшились в четыре раза по сравнению с контрольным вариантом [24]. Другое исследование показало, что внесение УНТ в почву увеличивает число цветков и плодов томата в два раза, при этом размер и качество листьев не изменяются по сравнению с листьями, выращенными в контрольной почве [25].

С помощью физиологических и морфологических анализов положительное влияние УНТ было оценено на различных культурах, включая шпинат, салат, огурец, перец чили в гидропонной культуре. Длина корней и побегов шпината и салата резко сократилась после 15 дней гидропонного выращивания с воздействием 1000 мг/л и 2000 мг/л УНТ. Наиболее чувствительными к растворам УНТ культурами были шпинат и салат, за которыми следовал огурец; было показано, что растворы УНТ для гидропонного выращивания обладают незначительной токсичностью или вообще не имеют токсичности к перцу чили [26]. Использование УНТ привело к значительному улучшению показателей прорастания и стимулировало усиленный рост его вегетативной массы [27].

Исследователи предположили, механизм положительного влияния углеродных нанотрубок на растения может быть связан с их поверхностным зарядом. УНТ способны стимулировать синтез белков, формирующих водные каналы в клетках растений томата. Это приводит к улучшению системы водного транспорта в растении и повышению эффективности поглощения воды.

Такой эффект может объяснять наблюдаемое улучшение всхожести и роста растений при использовании УНТ, а также их повышенную устойчивость к водному стрессу. По сути, нанотрубки действуют как биостимуляторы, активирующие естественные механизмы растения по управлению водным балансом [25, 28, 29].

Таким образом, УНТ могут ускорять прорастание семян и усиливать развитие корневой системы за счёт улучшения проницаемости клеточных мембран и транспорта питательных веществ.

- «Умные» системы доставки удобрений и пестицидов

Углеродные нанотрубки представляют собой инновационный тип удобрений, сочетающий функции стимулятора роста и средства с пролонгированным высвобождением питательных веществ. Их главное преимущество – способность работать как «умные» системы доставки, которые самостоятельно регулируют подачу удобрений и пестицидов в зависимости от потребностей растения. Механизм действия основан на уникальной способности наноуглерода поглощать азот и выделять ионы водорода, что значительно улучшает способность растений усваивать воду и питательные вещества. Это приводит к более эффективному поглощению важнейших макроэлементов – азота, фосфора и калия [19]. Высокая проводимость воды в УНТ позволяет создавать на их основе эффективные наноплатформы для решения различных проблем питания растений. При этом системы доставки на основе углеродных нанотрубок обеспечивают точечную подачу агрохимикатов, минимизируя их попадание в окружающую среду и негативное воздействие на здоровые ткани растений.

УНТ могут служить носителями для микроэлементов, удобрений или пестицидов, обеспечивая их медленное и контролируемое высвобождение. Это снижает расход химикатов и минимизирует их негативное влияние на экосистему. Например, нанотрубки с «загруженными» питательными веществами доставляют их напрямую к корням растений, повышая эффективность усвоения.

- Биосенсоры для точного земледелия

Углеродные нанотрубки (УНТ) способны регулировать физиологические процессы растений, преодолевать клеточные барьеры и обеспечивать «умную» доставку необходимых веществ. Потенциал УНТ также включает их применение в качестве многофункциональных носителей и основы для разработки биосенсорных технологий, что способствует инновационному развитию агропромышленного комплекса [21, 30].

УНТ интегрируют в датчики для мониторинга параметров почвы (влажность, pH, содержание азота) и расте-

ний. Это позволяет оптимизировать полив, внесение удобрений и прогнозировать урожайность. Такие сенсоры могут работать в режиме реального времени, передавая данные через IoT-платформы.

- Защита растений от патогенов

Различные инфекционные заболевания растений в основном вызываются патогенными организмами, такими как вирусы, бактерии, грибки, нематоды, а также насекомыми и паразитическими растениями. Эти инфекционные болезни растений постоянно являются причиной серьезного ущерба росту растений и потерь урожая овощных культур [2].

Антибактериальная активность УНТ определяется комплексом факторов, включающих их состав, модификацию свойств внешнего слоя, размеры и диаметр, а также внешние условия, такие как диспергирующая способность, культуральная среда, тип бактерии, дозировка и время реакции. Эффективность УНТ как потенциальных антибактериальных агентов обусловлена их высокой стабильностью и специфическими механизмами взаимодействия с бактериями, что делает их перспективным материалом для разработки новых антибактериальных препаратов с заданными свойствами [31].

УНТ демонстрируют выраженную антибактериальную активность за счет комбинированного физического и химического воздействия на бактерии: при прямом контакте происходит механическое повреждение клеточной мембраны, что вызывает изменение формы клеток, последующую утечку цитоплазмы, высвобождение ферментов и электролитов, а также распад липидов, что в итоге приводит к гибели микроорганизмов. [32].

ОУНТ демонстрируют выраженные антибактериальные свойства благодаря механическому повреждению клеточных мембран бактерий при прямом контакте. Особенно эффективны ОУНТ с узким распределением диаметра, что делает их перспективным материалом для создания новых антибактериальных покрытий и изделий.

Кроме того, многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) способны усиливать защитные механизмы растений, активируя антиоксидантную систему. Это подтверждается исследованиями на томатах, где применение МУНТ привело к повышению содержания аскорбиновой кислоты, флавоноидов и активности глаттионпероксидазы, что способствовало более эффективной защите от патогена *A. solani*. Дополнительным преимуществом является улучшение фотосинтетической активности и водного обмена растений при использовании МУНТ [33].

В связи с тем, что УНТ обладают антимикробными свойствами, их часто используют для создания покрытий семян или обработки растений (например, в виде спреев), чтобы подавлять грибки, бактерии и вирусы.

- Сорбция токсинов и адаптация к стрессам окружающей среды

Высокая адсорбционная способность УНТ помогает очищать почву от тяжелых металлов, пестицидов и дру-

гих загрязнителей. Различные биотические (патогены и травоядные) и абиотические (засоление, засуха, жара, высокая освещенность и тяжелые металлы) нагрузки на сельскохозяйственные культуры усугубляются сокращением пахотных земель, нехваткой водных ресурсов, последствиями изменения климата и использованием некачественных агрохимикатов, что оказывает негативное воздействие на рост сельскохозяйственных культур и урожайность. Добавление УНТ в почву повышает её влагоёмкость, что критично в засушливых регионах. Ежегодно засуха и засоление становятся причиной потерь сельского хозяйства на миллиарды долларов [3].

Исследования показали, что углеродные нанотрубки способны улучшать рост и продуктивность растений в условиях абиотического стресса. Особенно эффективна противогрибковая активность МУНТ с поверхностными функциональными группами ОН-, СООН- и -NH₂ против патогена растений *Fusarium graminearum*: при концентрации 500 г/мл длина спор гриба уменьшилась практически вдвое - с 54,5 мкм до 28,3, 27,4 и 29,5 мкм соответственно. [34].

Накопление пестицидов в растениях существенно различается в зависимости от вида сельскохозяйственных культур, типа и концентрации используемых углеродных наноматериалов, при этом адсорбционные исследования демонстрируют, что углеродные нанотрубки значительно влияют на транспорт и судьбу адсорбированных органических загрязнителей в почве, что может потенциально изменять их биодоступность и токсичность для живых организмов. [35].

Углеродные нанотрубки оказывают значительное влияние на биохимические и физиологические процессы в растениях, воздействуя на фотосинтез и активируя защитные механизмы через положительно регулирующие стрессовые гены. Наибольшее стимулирующее действие на рост растений томата оказывают хорошо диспергированные функционализированные УНТ с сильными функциональными группами, поскольку они активируют аквапорины [36].

МУНТ способны проникать в клетки взрослой растения брокколи, причем их накопление усиливается при солевом стрессе, оказывая комплексное положительное влияние на рост растений через улучшение поглощения воды благодаря более благоприятным энергетическим силам, повышенную ассимиляцию CO₂, изменение содержания липидов, жесткости и проницаемости плазматических мембран корней, а также усиление трансдукции аквапорина, что способствует оптимизированной транспортировке воды и снижает негативное воздействие солевого стресса. [19].

Области применения УНТ могут быть самые разнообразные. Например, добавление УНТ в полимеры повышает прочность и износостойкость деталей техники (например, теплиц, систем капельного полива), снижая затраты на ремонт, а лёгкие композитные материалы с УНТ уменьшают вес машин, экономя топливо. Кроме того, УНТ можно использовать для очистки воды для полива, а именно, УНТ применяют в фильтрах для уда-

ления солей, органических загрязнений и микропластика из воды, что особенно важно в регионах с дефицитом чистой воды.

Взаимодействие УНТ с растениями овощных культур

В современном научном мире пристальное внимание уделяется изучению процессов, связанных с проникновением и перемещением наночастиц в тканях растений, особенно это касается овощных культур. Уникальная особенность растительных клеток заключается в наличии защитного барьера – клеточной стенки, построенной из сложной сети целлюлозных волокон. Интересно отметить, что наночастицы и их объединения благодаря своим небольшим размерам могут беспрепятственно проходить через поры клеточной стенки. При этом они передвигаются по межклеточному пространству, следуя апопластному пути, что позволяет им проникать внутрь клетки без повреждения её структурных элементов [37]. Вид растения, возраст, условия роста, физико-химическое качество, функционализация, стабильность и распределение наночастиц влияют на их поглощение, транслокацию и накопление [38].

МУНТ оказывают значительное влияние на физиологию растений: они способны модулировать экспрессию ключевых генов, связанных с водным обменом и стрессовыми реакциями, активировать синтез аквапоринов – белков, обеспечивающих транспорт воды через клеточные мембранны, и стимулировать развитие корневой системы за счет формирования дополнительных транспортных пор в клеточных структурах. При солевом стрессе МУНТ демонстрируют защитный эффект: они проникают в клетки растений и улучшают водный режим благодаря изменению липидного состава и повышению проницаемости плазматических мембран корней, усиливают передачу водного сигнала через активацию аквапоринов, что в итоге снижает негативное воздействие засоления на растения [19].

Углеродные нанотрубки (УНТ) эффективно проникают в различные растительные культуры в гидропонных условиях, причём их проникновение зависит от размера, функционализации и условий окружающей среды, при этом функционализированные УНТ демонстрируют лучшую проникающую способность; они улучшают морфологическое развитие растений, увеличивают биомассу всех органов, активируют гены роста и повышают концентрацию ауксинов, что в итоге положительно влияет на общий рост и развитие растений [39].

Функционализированные углеродные нанотрубки проникают в клетки растений при помощи биомакромолекул (белков, антител, ДНК) на своей поверхности через энергозависимый эндоцитарный механизм, а при корневой контаминации как функционализированные, так и нефункционализированные УНТ способны проникать в клетки, после чего транспортируются по сосудистой системе растения вместе с водой и питательными веществами в верхние части растения, что подтверждается обнаружением низких концентраций УНТ в стеблях, побегах, листьях и плодах растений. [40].

Многостенные углеродные нанотрубки, несмотря на свои относительно большие размеры по сравнению с фуллеренами и одностенными углеродными нанотрубками, способны проникать в растения и перемещаться внутри них, формируя новые поры и проникая через твёрдые оболочки семян. Установлено присутствие МУНТ в вегетативных органах и цветках томатов, а их транслокация в растениях может осуществляться через капиллярные механизмы, причём при достижении узких участков сосудистой системы УНТ могут блокировать транспорт питательных веществ и других материалов. [41].

Перспективы использования

Открытие УНТ вызвало большой научный интерес благодаря их исключительным свойствам: миниатюрным размерам, обширной площади поверхности и способности проникать через клеточные мембранны. В сельском хозяйстве УНТ могут стать революционной технологией, улучшая развитие растений и оптимизируя использование удобрений. Однако исследования выявили и обратную сторону: нанотрубки способны негативно влиять на растительный организм, вызывая окислительный стресс, изменение генетической экспрессии и даже гибель клеток. Наблюдаются такие симптомы, как уменьшение корневой системы, деформация листьев и снижение общей жизнеспособности растений.

Применение УНТ в сельском хозяйстве сопряжено с рядом серьезных ограничений. Во-первых, они способны накапливаться в почве и негативно влиять на почвенную микрофлору, снижая её разнообразие и численность. Дополнительную обеспокоенность вызывает способность УНТ выступать в роли переносчиков загрязняющих веществ, что может привести к их накоплению в сельскохозяйственных культурах. При этом нанотрубки могут проникать через корневую систему и распространяться по всему растению, достигая съедобных частей. Существенным препятствием для широкого внедрения УНТ является их высокая стоимость по сравнению с традиционными удобрениями и противомикробными препаратами. Для успешной конкуренции на рынке необходимо решить вопросы масштабирования производства и возможности повторного использования УНТ, что позволит снизить их себестоимость и сделать более привлекательными для практического применения в сельском хозяйстве. [42].

Несмотря на растущий интерес к применению УНТ в овощеводстве, эта область исследований находится на начальной стадии развития. Существует множество белых пятен в понимании механизмов взаимодействия УНТ с растительными системами. Требуются дополнительные исследования для прояснения ряда ключевых вопросов: как именно УНТ влияют на поглощение воды при прорастании семян, каким образом они участвуют в реакциях растений на абиотический стресс, как происходит их перемещение внутри растительных тканей и как они влияют на экспрессию генов. Особую озабоченность вызывает потенциальная токсичность УНТ для растений, почвенных микроорганизмов и человека при употреблении.

нии загрязненных продуктов питания. Перед коммерческим внедрением УНТ в сельском хозяйстве необходимо разработать надёжные методы оценки и минимизации их токсикологического воздействия, а также провести всесторонние испытания их безопасности для живых организмов и человека

Выводы

В данном обзоре рассматривается роль УНТ в развитии растений и их потенциал для устойчивого овощеводства. Уникальные физико-химические свойства УНТ, определяемые их структурой (диаметром, спиральностью и количеством графеновых слоев), представляют значительный интерес для современного растениеводства. Концепция устойчивого овощеводства нацелена на сокращение применения агрохимикатов без ущерба для урожайности и при обеспечении экономической эффек-

тивности производства. УНТ могут сыграть важную роль в достижении этих целей. Однако расширение их применения в сельском хозяйстве неизбежно приведет к увеличению распространения нанотрубок в окружающей среде, что требует тщательной оценки их влияния на экосистему. В то же время, не вполне определено влияние УНТ на нативные объекты и живые организмы.

Для безопасного и эффективного использования УНТ в устойчивом овощеводстве необходимы дальнейшие исследования механизмов их поглощения и распределения в растительных тканях. Это позволит разработать оптимальные методы их применения и минимизировать потенциальные риски для окружающей среды и здоровья человека.

Таким образом, УНТ могут стать инструментом для перехода к высокотехнологичному сельскому хозяйству, но их использование требует баланса между инновациями и экологической безопасностью.

• Литература / References

1. Acharya A., Pal P.K. Agriculture nanotechnology: translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability. *NanoImpact*. 2020;19:100232. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100232>
2. Nazarov P.A., Baleev D.N., Ivanova M.I., Sokolova L.M., Karakozova M.V. Infectious plant diseases: etiology, current status, problems and prospects in plant protection. *Acta Naturae*. 2020;12(3):46-59. (In Russ.) <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026>
3. Bukharov A.F., Fedosov A.Yu., Ivanova M.I. Impacts of climate change on vegetable production and ways to overcome them. *Vegetable crops of Russia*. 2023;(3):41-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-3-41-49> <https://www.elibrary.ru/ncmioc>
4. Vogel E., Donat M.G., Alexander L.V., Meinshausen M., Ray D.K., Karoly D., Meinshausen N., Frieler K. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environ Res Lett*. 2019;14:054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab154b>
5. Fedosov A.Yu., Menshikh A.M. Precision farming technologies in vegetable growing. *Vegetable crops of Russia*. 2022;(6):40-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-6-40-45> <https://www.elibrary.ru/zkrp1>
6. Menshikh A.M., Fedosov A.Yu., Yanchenko V.A., Fartukov V.A., Ivanova M.I. Intelligent irrigation system: digital solutions in vegetable growing. *Rice growing*. 2024;23,2(63):76-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2024-63-2-76-84> <https://www.elibrary.ru/shioub>
7. Lowry G.V., Avellan A., Gilbertson L.M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution. *Nat Nanotechnol*. 2019;14:517-22. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0461-7>
8. Kah M., Kookana R.S., Gogos A., Bucheli T.D. A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nat Nanotechnol*. 2018;13:677-84. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1>
9. Zelenkov V.N., Ivanova M.I., Latushkin V.V., Potapov V.V., Timakova L.N. Hydrothermal nanosilica in the production of microgreens as a functional food product. *Topical biotechnology*. 2022;(1):291. (In Russ.) <https://doi.org/10.20914/2304-4691-2022-1-291>
10. Poddar K., Vijayan J., Ray S., Adak T. Nanotechnology for sustainable agriculture. In: *Biotechnology for sustainable agriculture*. Amsterdam: Elsevier; 2018. P. 281-303. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812160-3.00010-6>
11. Zhao L., Lu L., Wang A., Zhang H., Huang M., Wu H., Xing B., Wang Z., Ji R. Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *J Agric Food Chem*. 2020;68:1935-47. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>
12. Malik A., Mor V.S., Tokas J., Punia H., Malik S., Malik K., Sangwan S., Tomar S., Singh P., Singh N. Biostimulant-treated seedlings under sustainable agriculture: a global perspective facing climate change. *Agronomy*. 2021;11:14. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010014>
13. Safdar M., Kim W., Park S. et al. Engineering plants with carbon nanotubes: a sustainable agriculture approach. *J Nanobiotechnol*. 2022;(20):275. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01483-w>
14. Patel A., Tiwari S., Parihar P., Singh R., Prasad S.M. Carbon nanotubes as plant growth regulators: impacts on growth, reproductive system, and soil microbial community. In: *Nanomaterials in plants, algae and microorganisms*. Amsterdam: Elsevier; 2019. P. 23-42. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811488-9.00002-0>
15. Mathew S., Tiwari D., Tripathi D. Interaction of carbon nanotubes with plant system: a review. *Carbon Lett*. 2021;31:167-176. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00195-1>
16. Cañas J.E., Long M., Nations S., Vadan R., Dai L., Luo M., Ambikapathi R., Lee E.H., Olszyk D. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environ Toxicol Chem*. 2008;27:1922-31. <https://doi.org/10.1897/08-117.1>
17. Lin C., Fugetsu B., Su Y., Watari F. Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on *Arabidopsis* T87 suspension cells. *J Hazard Mater*. 2009;170:578-83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.025>
18. Khodakovskaya M., Dervishi E., Mahmood M., Xu Y., Li Z., Watanabe F., Biris A.S. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*. 2009;3:3221-7. <https://doi.org/10.1021/nn900887m>
19. Martínez-Ballesta M.C., Zapata L., Chalbi N., Carvajal M. Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *J Nanobiotechnol*. 2016;14(1):42. <https://doi.org/10.1186/s12951-016-0199-4>
20. Kumar V., Sachdev D., Pasricha R., Maheshwari P.H., Taneja N.K. Zinc-supported multiwalled carbon nanotube nanocomposite: a synergism to micronutrient release and a smart distributor to promote the growth of onion seeds in arid conditions. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2020;12(34):37532-42. <https://doi.org/10.1021/acs.applmat.0c03001>

- Interfaces. 2018;10:36733–45.
<https://doi.org/10.1021/acsami.8b13464>
21. Giraldo J.P., Wu H., Newkirk G.M., Kruss S. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. *Nat. Nanotechnol.* 2019;(14):541–553.
<https://doi.org/10.1038/s41565-019-0470-6>
22. Haghghi M., Teixeira da Silva J.A. The effect of carbon nanotubes on the seed germination and seedling growth of four vegetable species. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 2014;(17): 201–208.
<https://doi.org/10.1007/s12892-014-0057-6>
23. Pourkhalee A., Haghghi M., Saharkhiz M.J., Jouzi H., Doroodmand M.M. Carbon nanotubes can promote seed germination via seed coat penetration. *Seed Technol.* 2011;(33):155–69.
24. Alimohammadi M., Xu Y., Wang D., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Physiological responses induced in tomato plants by a two-component nanostructural system composed of carbon nanotubes conjugated with quantum dots and its *in vivo* multimodal detection. *Nanotechnology.* 2011;22:295101.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/29/295101>
25. Khodakovskaya M.V., Kim B.S., Kim J.N., Alimohammadi M., Dervishi E., Mustafa T., Cerniglia C.E. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small.* 2013;9:115–123.
<https://doi.org/10.1002/smll.201201225>
26. Begum P., Fugetsu B. Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L.) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. *J Hazard Mater.* 2012;243:212–22.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.025>
27. Srivastava A., Rao D.P. Enhancement of seed germination and plant growth of wheat, maize, peanut and garlic using multiwalled carbon nanotubes. *Eur. Chem. Bull.* 2014;(3): 502–504.
<https://doi.org/10.17628/ECB.2014.3.502-504>
28. Villagarcia H., Dervishi E., de Silva K., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small.* 2012;8:2328–34.
<https://doi.org/10.1002/smll.201102661>
29. Lahiani M.H., Dervishi E., Chen J., Nima Z., Gaume A., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2013;5:7965–73. <https://doi.org/10.1021/am402052x>
30. Kwak S.-Y., Lew T.T.S., Sweeney C.J., Koman V.B., Wong M.H., Bohmert-Tatarev K., Snell K.D., Seo J.S., Chua N.-H., Strano M.S. Chloroplast-selective gene delivery and expression in planta using chitosan-complexed single-walled carbon nanotube carriers. *Nat Nanotechnol.* 2019;14:447–55.
<https://doi.org/10.1038/s41565-019-0375-4>
31. Thines R., Mubarak N., Nizamuddin S., Sahu J., Abdullah E., Ganesan P. Application potential of carbon nanomaterials in water and wastewater treatment: a review. *J Taiwan Inst Chem Eng.* 2017;72:116–33. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.018>
32. Maksimova Y.G. Microorganisms and carbon nanotubes: interaction and applications. *Appl Biochem Microbiol.* 2019;55:1–12.
<https://doi.org/10.1134/S0003683819010101>
33. González-García Y., Cadenas-Pliego G., Alpuche-Solís Á.G., Cabrera R.I., Juárez-Maldonado A. Carbon nanotubes decrease the negative impact of *Alternaria solani* in tomato crop. *Nanomaterials.* 2021;11:1080.
<https://doi.org/10.3390/nano11051080>
34. Wang X., Zhou Z., Chen F. Surface modification of carbon nanotubes with an enhanced antifungal activity for the control of plant fungal pathogen. *Materials.* 2017;10:1375.
<https://doi.org/10.3390/ma10121375>
35. De La Torre-Roche R., Cantu J., Tamez C., Zuverza-Mena N., Hamdi H., Adisa I.O., Elmer W., Gardea-Torresdey J., White J.C. Seed Biofortification by engineered nanomaterials: a pathway to alleviate malnutrition? *J. Agric Food Chem.* 2020;68:12189–202.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04881>
36. Lahiani M.H., Dervishi E., Ivanov I., Chen J., Khodakovskaya M. Comparative study of plant responses to carbon-based nanomaterials with different morphologies. *Nanotechnology.* 2016;27:265102.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/26/265102>
37. O'Neill M.A., York W.S. The Composition and Structure of Plant Primary Cell Walls In book: *Annual Plant Reviews online. April* 2018. Pp. 1–54.
<https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0067>
38. Rai M., Ribeiro C., Mattoso L., Duran N. Nanotechnologies in food and agriculture. Berlin: Springer; 2015.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7>
39. Guo X., Zhao J., Wang R., Zhang H., Xing B., Naeem M., Yao T., Li R., Xu R., Zhang Z. Effects of graphene oxide on tomato growth in different stages. *Plant Physiol Biochem.* 2021;162:447–55.
https://doi.org/10.1007/978-981-97-5104-4_8
40. Lahiani M.H., Nima Z.A., Villagarcia H., Biris A.S., Khodakovskaya M.V. Assessment of Effects of the Long-Term Exposure of Agricultural Crops to Carbon Nanotubes. *J Agric Food Chem.* 2018;66(26):6654–6662.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01863>
41. Servin A., Elmer W., Mukherjee A., De la Torre-Roche R., Hamdi H., White J.C., Dimkpa C. A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research.* 2015;17(2).
<https://doi.org/10.1007/s11051-015-2907-7>
42. Chen G., Qiu J., Liu Y., Jiang R., Cai S., Liu Y., Zhu F., Zeng F., Luan T., Ouyang G. Carbon nanotubes act as contaminant carriers and translocate within plants. *Sci Rep.* 2015;5:1–9.
<https://doi.org/10.1038/srep15682>

Об авторах:

Алексей Владимирович Янченко – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физиологических основ семеноведения,
<https://orcid.org/0000-0002-1031-9459>, SPIN-код: 2128-9539

Александр Юрьевич Федосов – младший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0001-9492-8667>, SPIN-код: 4882-6547

Александр Михайлович Меньших – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0001-7254-8487>, SPIN-код: 8471-3584

Елена Валерьевна Янченко – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-3165-7238>, SPIN-код: 6301-7782, автор для переписки, elena_0881@mail.ru

Мария Ивановна Иванова – доктор с.-х. наук, проф. РАН, гл. научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>, SPIN-код: 1961-9188

About the Authors:

Alexey V. Yanchenko – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Physiological Foundations of Seed Science, <https://orcid.org/0000-0002-1031-9459>, SPIN-code: 2128-9539

Alexander Yu. Fedosov – Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9492-8667>, SPIN-код: 4882-6547

Alexander M. Menshikh – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7254-8487>, SPIN-код: 8471-3584

Elena V. Yanchenko – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3165-7238>, SPIN-код: 6301-7782, Corresponding Author, elena_0881@mail.ru

Maria I. Ivanova – Dr. Sci. (Agriculture), Prof., Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7326-2157>, SPIN-код: 1961-9188