

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТЕНИЯ ПЕРЦА ПРИ БИОКУЛЬТИВИРОВАНИИ НА ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ С НАНОЧАСТИЦАМИ ЖЕЛЕЗА В АСЕПТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2022 г. О. А. Богословская<sup>1\*</sup>, И. П. Ольховская<sup>1</sup>, Г. С. Нечитайло<sup>2</sup>, Н. Н. Глущенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: obogo@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2021;

после доработки 22.03.2022;

принята в печать 20.04.2022

В работе предложен метод модификации питательной среды для выращивания высших растений в асептических условиях, путем замены традиционных добавок солей микроэлементов на наночастицы (НЧ). Представлены данные по влиянию НЧ железа в составе питательной среды Мурасиге–Скуга на морфометрические и физиологические показатели растений перца: изменение структуры листьев, содержание хлорофилла и урожайность. Показано, что посадочный материал, культивируемый на средах с НЧ железа вместо сульфата железа в асептических условиях, обладает улучшенными морфометрическими и физиологическими показателями, что является фактором увеличения урожая плодов перца на 6–125% по сравнению с контролем.

**Ключевые слова:** среда Мурасиге–Скуга, морфометрические показатели, хлорофилл, активность корня, структура листьев, урожайность.

**DOI:** 10.31857/S0207401X22120032

### ВВЕДЕНИЕ

Использование биотехнологий в сельском хозяйстве ориентировано на стабильное развитие сельскохозяйственного производства. Методы культивирования растительных тканей наиболее часто используются в качестве биотехнологических инструментов для базовых и прикладных целей: как для исследований процессов развития растений, так и для их коммерческого получения с конкретными промышленными и агрономическими признаками, а также для селекции растений, удаления вирусов из инфицированных особей с целью выращивания высококачественного здорового растительного материала и улучшения урожая [1].

Центральной проблемой биотехнологии является интенсификация биопроцессов как за счет повышения потенциала биологических агентов и их систем, так и за счет усовершенствования методов применения биокатализаторов [2–6]. В этом отношении использование наноразмерных структур в различных приемах оздоровления и культивирования посадочного материала, а возможно, и клонального размножения растений, представляет собой перспективное направление. Подбор питательных сред, обеспечивающих по-

требности культуры ткани продуцента в химических компонентах, необходимых для оптимального роста и развития растений и/или биосинтеза целевого продукта, является важным фактором создания эффективной биотехнологической системы. Смеси минеральных солей (макро- и микроэлементов) – обязательные компоненты питательных сред, помимо витаминов и сахарозы как источника углерода.

Наши многолетние исследования позволили установить следующие особенности действия НЧ на биосистемы. Наночастицы металлов имеют низкую токсичность, в 7–50 раз меньшую токсичности металлов в ионной форме; обладают пролонгированным и полифункциональным действием; в биотических дозах, т.е. в дозах, в 10–50 раз меньших максимально переносимых доз, стимулируют обменные процессы; легко проникают во все органы и ткани, проявляют синергидный эффект с природными полисахаридами, а их биологическая активность зависит от особенностей строения частиц и их физико-химических характеристик [7–10]. Учитывая эти уникальные свойства НЧ металлов, мы включили их в состав питательной среды вместо солей.

Большая часть новейшей литературы по применению нанотехнологий посвящена удобрениям и пестицидам в виде наночастиц, а также сенсорам при выращивании и защите растений [11]. Удобрения с наночастицами — это экологически чистые удобрения или “интеллектуальные” удобрения, способные уменьшить нормы внесения удобрений и снизить потери питательных веществ из них, в основном фосфора и азота [12]. Наночастицы обеспечивают постепенное и контролируемое высвобождение питательных веществ и эффективное использование их растениями, что помогает предотвратить загрязнение водных объектов и окружающей среды [13]. Удобрения с наночастицами способны как сами обеспечивать растения питательными веществами, так и усиливать действие удобрений даже при применении их в меньших количествах [14]. Внекорневое применение таких удобрений снижает стресс у растений [15].

Удобрения с наночастицами можно разделить на следующие категории в зависимости от потребности растений в питательных веществах: 1) удобрения с макроэлементами, 2) удобрения с микроэлементами. Удобрения с макроэлементами состоят из комбинации элементов, таких как калий (K), магний (Mg), азот (N), кальций (Ca) и фосфор (P). По прогнозам, общее потребление макроэлементных удобрений увеличится до 263 млн т в 2050 г., что свидетельствует о существенной потребности в этих удобрениях в сельскохозяйственном секторе.

Группа ученых [16] проверила эффективность действия наночастиц Mg и Fe на рост черноглазого гороха (*Vigna unguiculata*) путем внекорневой подкормки и отметила увеличение фотосинтетической способности листьев и массы семян, что, в свою очередь, привело к повышению урожайности культуры. Наночастицы Ca вместе с гуминовыми кислотами улучшали рост проростков арахиса на 30% [17]. Наши исследования показали, что предпосевная обработка семян ярового ячменя наночастицами железа, цинка и меди в составе полимерной пленки повышает урожайность на 4.1% по сравнению с необработанными семенами. При этом влажность бункерного зерна была ниже, чем влажность зерна контрольной группы на 2.2%, что способствовало экономии энергии при его сушке [18].

На основании вышеизложенного становится очевидным, что при культивировании растений в асептических условиях замена солей жизненно необходимых металлов железа, цинка, меди в составе питательной среды Мурасиге—Скуга на НЧ этих металлов может оказаться эффективной [19]. В представленной работе наночастицы этих элементов с заданными физико-химическими характеристиками в разных концентрациях инди-

видуально или в комбинации друг с другом в разных соотношениях вводились в состав питательной среды.

Целью наших исследований было изучение морфометрических, физиологических, анатомических показателей растений перца, выращенного на модифицированной наночастицами железа среде Мурасиге—Скуга, и его урожайности при культивировании в грунте.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наночастицы железа были получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 в ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН [20]. Исследование физико-химических характеристик НЧ железа было проведено сотрудниками Лаборатории нано- и микроструктурного материаловедения. Определены: средний диаметр наночастиц Fe ( $27.0 \pm 0.51$  нм), содержание кристаллической металлической фазы (53.6%), содержание фазы оксида железа Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (46.4%), толщина оксидной пленки (3.5 нм) [21].

Объект исследования — культура растения перца *Capsicum annuum* L. сорта *LJ-king*. Для культивирования растений в работе использовали питательную среду Мурасиге—Скуга [19].

В подготовленные стерильные банки с питательной средой раскладывали по 3 шт. семян перца в каждую банку. Для каждого варианта среды использовали по 10 банок с тремя семенами в каждой. Банки с семенами помещали на стеллажи в стерильной комнате с контролируемым постоянным режимом: температура — 22–25 °С, влажность — 36%, освещенность — 3500–3000 лк в режиме 12 ч свет/12 ч темнота в сутки.

Через 15 сут роста проверяли всхожесть семян. Через 40 сут роста и развития растений оценивали следующие морфометрические показатели: длину корня, длину ростка, массу зеленой части растений; физиологические показатели: активность корня и содержание хлорофилла. Активность корня определяли по восстановлению трифенилтетразолия хлорида (ТТХ). Корни инкубировали с раствором ТТХ при 37 °С в течение 1.5 ч. Добавляли H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, этилацетат, корень растирали в ступке пестиком, и суспензию фильтровали. На спектрофотометре измеряли поглощение фильтрата при длине волны 485 нм [22]. Выделение хлорофилла из листьев перца проводили путем экстракции 100%-ным уксусом. Экстракты центрифугировали и измеряли их спектры поглощения при 662 и 645 нм [23].

Для оценки урожайности растения перца через 60 дней от начала культивирования растений в асептических условиях посадочный материал из стерильных банок высаживали в почву теплицы. В теплице поддерживали следующие условия:

температура почвы составляла 10–25 °С, температура воздуха днем – 13–28 °С, ночью – 15–20 °С в зависимости от фазы роста и развития растений.

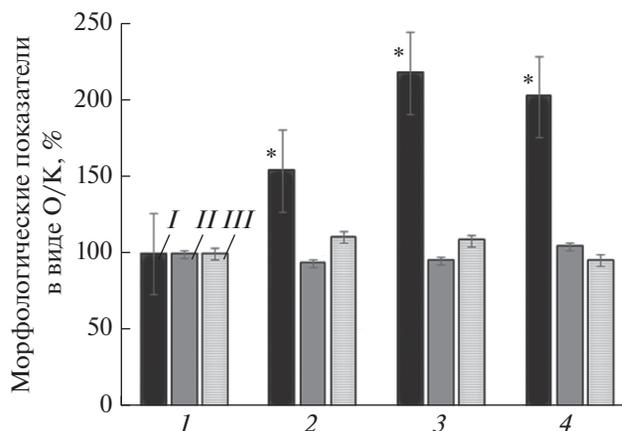
Почву в теплице для посадки перцев готовили следующим образом: сначала вспахивали, затем добавляли органическое удобрение и снова вспахивали, добиваясь равномерного перемешивания. Органическое удобрение содержало N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O. Доза вносимого органического удобрения составляла 150 кг/м<sup>2</sup>. Для полива растений применяли капельный метод. Капельная оросительная труба проходила в почве. Почву мульчировали пластиком, благодаря чему сохраняли влажность почвы.

Статистическую обработку данных осуществляли в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 20 (“StatSoft, Inc.”, USA). Определяли средние значения изучаемых показателей (M) и стандартные ошибки среднего ( $\pm$ SEM). Достоверность различий между вариантами (*p*) оценивали методами параметрической (*t*-критерий Стьюдента) статистики. Различия между вариантами считали статистически значимыми при  $p \leq 0.05$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Культивирование растений на питательных средах в асептических условиях отвечает современным требованиям качества посадочного материала [11]. Одним из факторов культивирования растений являются условия их выращивания. Помимо температуры и освещенности, большое значение имеет состав питательных сред, как правило, сбалансированный по содержанию не только витаминов, аминокислот, гидролизатов, хелатов и других веществ, но и по содержанию макро- и микроэлементов. Учитывая уникальные биологические свойства НЧ металлов, мы разработали способ введения в питательную среду наночастиц жизненно необходимых элементов, заменяя сульфаты металлов на НЧ. Высокая реакционная способность наночастиц накладывает определенные требования на способ приготовления питательных сред, поскольку наночастицы, обладающие высокой удельной поверхностью, в водной среде активно агрегируют друг с другом. При этом необходимо сохранять стерильность питательной среды. Подробно процедура создания стерильной питательной среды с наночастицами металлов на основе среды Мурасиге–Скуга описана в нашем патенте [19].

Одним из жизненно важных элементов для роста растений является железо, дефицит которого приводит к развитию хлороза растений, задержке роста и снижению урожайности [24]. В последнее время НЧ железа стали использовать в виде удобрений с целью повышения как урожайности, так и качества продукции растениеводства. Показа-



**Рис. 1.** Изменение длины корня (I), длины ростка (II) и массы зеленой части растения перца (III), культивируемого в асептических условиях на питательной среде Мурасиге–Скуга (I) и на модифицированной среде с наночастицами Fe в концентрациях 0.06 (2), 0.3 (3), 3.0 мг/л (4); данные представлены в виде опыт/контроль (O/K, %); \* –  $p \leq 0.05$ .

но, что эти НЧ повышают абсорбцию питательных веществ, увеличивают фотосинтетическую активность листьев, усиливают обменные процессы [25]. Однако морфометрические, физиологические, анатомические изменения растений, культивируемых на питательных средах с добавлением наночастиц Fe, не изучены. Ранее нами установлено, что наночастицы металлов обладают биотическим действием, т.е. стимулируют обменные процессы в концентрациях, в 10–100 раз меньших значений максимально переносимой дозы. С учетом этого факта в питательные среды наночастицы Fe были введены в концентрациях, в 2–100 раз меньших, чем стандартная концентрация железа сульфата в среде Мурасиге–Скуга. Содержания остальных компонент, входящих в состав питательной среды, оставляли без изменений [19].

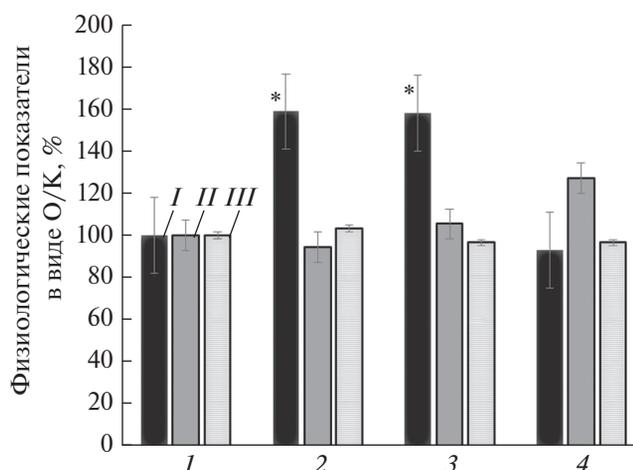
При выращивании растения перца на питательной среде, содержащей вместо железа в ионной форме НЧ железа в концентрациях 0.06, 0.3 и 3.0 мг/л, наблюдается изменение морфометрических параметров растений (рис. 1, 2). Так, длина корня растения при концентрациях НЧ железа 0.06, 0.3 и 3.0 мг/л увеличивается на 54%, 118% и 102%, соответственно, по сравнению с растением, выращенным на стандартной среде Мурасиге–Скуга. Стимуляцию роста корней при действии наночастиц Fe наблюдали многие авторы на примере различных растений, в том числе арахиса, сои, шпината и др. [25–30]. Введение в состав питательной среды НЧ железа слабо отражается на длине ростка и зеленой массе растения (рис. 1).

На рис. 3 представлены результаты влияния НЧ железа в составе питательной среды Мурасиге–Скуга на урожайность перца.



**Рис. 2.** Фотография проростков растения перца, культивированного в асептических условиях на питательной среде Мурагиге–Скуга (1) и на модифицированной среде с НЧ железа в концентрациях 0.06 (2), 0.3 (3) и 3.0 мг/л (4).

ге–Скуга на физиологические показатели растения перца. Видно, что при выращивании перца на питательной среде, содержащей вместо железа в ионной форме наночастицы железа в концентрации 0.06 и 0.3 мг/л, активность корня перца сорта *LJ-king* увеличивается соответственно на 59% и 58% по сравнению с контролем. Следовательно, полученные нами результаты, а также данные других исследователей демонстрируют, что НЧ железа в оптимальной концентрации являются фактором стимуляции роста и активности



**Рис. 3.** Изменение активности корня (I), содержания хлорофилла (II) и прорастания семян растения перца (III), культивированного в асептических условиях на питательной среде Мурагиге–Скуга (1) и на модифицированной среде с НЧ железа в концентрациях 0.06 (2), 0.3 (3) и 3.0 мг/л (4); данные представлены в виде опыт/контроль (О/К), %; \* –  $p \leq 0.05$ .

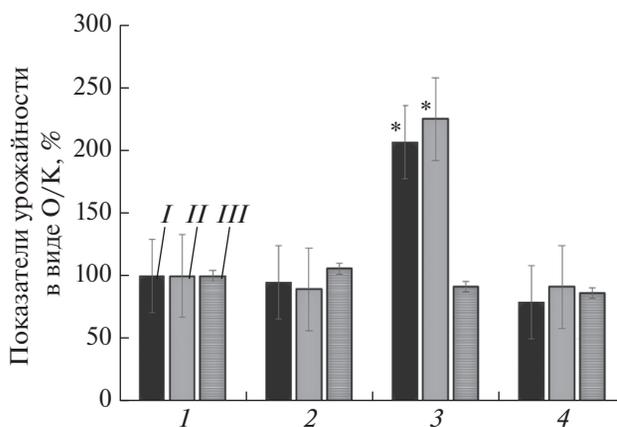
корня при формировании корневой системы растений.

Введение в питательную среду НЧ железа вместо железа в ионной форме оказывает влияние на прорастание семян и содержание хлорофилла. Как видно из рис. 3, введение в питательную среду НЧ железа в концентрации 0.06 мг/л повышает показатель прорастания семян перца на 3.5%, а в концентрациях 0.3 и 3.0 мг/л – способствует увеличению содержания хлорофилла в листьях соответственно на 5% и 27% по сравнению с контролем.

После 60 дней от начала культивирования растений в асептических условиях посадочный материал из стерильных банок высаживали в почву теплицы. Через 80 дней после высаживания растений был собран урожай перцев. Результаты исследования приведены на рис. 4.

Видно, что урожайность растения перца в экспериментальных группах разная. Так, наибольшую урожайность показал посадочный материал, выращенный на питательной среде с НЧ железа в концентрации 0.6 мг/л. По количеству плодов и общей массе значения показателей превышают контроль соответственно в 2.06 и 2.25 раза по сравнению с контролем.

При использовании НЧ железа в растениеводстве были изучены изменения физиологических функций растений. Так, установлено действие наночастиц  $Fe_2O_3$  на рост арахиса. Показано, что НЧ оксида железа стимулируют рост, увеличивают длину корней, высоту и биомассу растений, регулируя содержание фитогормонов и актив-



**Рис. 4.** Изменение показателей растения перца (I – урожайность, II – количество плодов, III – прорастание семян), посадочный материал которого выращен в асептических условиях на питательной среде Мурагиге–Скуга (1) и на модифицированной среде с НЧ железа в концентрациях 0.12 (2), 0.6 (3) и 3.0 мг/л (4); данные представлены в виде опыт/контроль (О/К), %; \* –  $p \leq 0.05$ .

Таблица 1. Показатели анатомического строения листа растения перца сорта *LJ-king* при воздействии железа сульфата и наночастиц железа (3 мкг/мл)\*\*

Показатели	Толщина клеточной стенки, мкм	Число хлоропластов на клетку	Содержание хлорофилла, мг/г
Fe <sup>2+</sup>	0.17 ± 0.02	8.0 ± 1.1	1.3 ± 0.3
НЧ Fe	0.10 ± 0.04*	12.0 ± 1.3*	1.5 ± 0.4

\* Значение  $p \leq 0.05$ .

\*\* M ± SEM.

ность антиоксидантных ферментов [31]. Влияние наночастиц Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> выражается в снижении общего содержания хлорофилла и каротиноидов и повышении уровня малонового диальдегида и основных показателей перекисного окисления липидов растений лаванды и тимьяна [32]. Однако наблюдаемые физиологические эффекты наших исследований и других авторов далеки от объяснения механизмов воздействия НЧ железа на растения. Мы предположили, что возможный механизм стимулирующего действия НЧ железа на растения может быть связан с изменением структуры и функции биологических компонентов.

В нашем исследовании проведен систематический анализ влияния наночастиц Fe на изменения структуры клеток листьев растения перца сорта *S. annuum* [31]. Установлено, что НЧ железа регулируют рост растений, причем низкие их концентрации играют положительную роль в образовании большего количества хлоропластов и способствуют более плотной упаковке гран в листьях по сравнению с контролем (действием Fe<sup>2+</sup>). Известно, что биогенез хлоропластов и организация гран являются двумя жизненно важными процессами развития хлоропластов, обеспечивающими захват света во время фотосинтеза [33]. Кроме того, было высказано предположение, что укладка гран играет важную роль в защите фотосистемы II, расположенной в сложенной грани, как это было представлено Андерсоном и Аро в 1994 году [34]. Повышенное содержание хлорофилла также свидетельствует об усилении эффективности фотосинтеза в растительных клетках.

Анатомические исследования свидетельствуют, что при действии НЧ железа изменения затрагивают толщину клеточных стенок (табл. 1). Известно, что растительные клеточные стенки проявляют крайнюю прочность на растяжение, а изменения механических свойств клеточных стенок могут не только существенно влиять на распределение устьиц и проницаемость клеточной стенки, но и на размер растительных клеток [30]. Не следует забывать также, что наночастицы Fe в биологических системах активно участвуют в реакции Хабера–Вайса с образованием ОН<sup>•</sup>-радикалов, которые могут вызвать ослабление клеточ-

ной стенки, облегчить растяжение клеток и тем самым способствуют увеличению параметров растений [35]. При действии НЧ железа происходит увеличение сосудистых пучков листьев, что приводит к усилению переноса питательных веществ. Наблюдаемые нами особенности изменения анатомии листа, мезофилла, плотности упаковки гран, величины клеточной стенки являются одним из важных ответов на воздействие наночастиц Fe, которые при действии в биотических концентрациях обеспечивают получение хорошо развитого посадочного материала, способствующего повышению урожайности перца.

Дальнейшие исследования с применением методов геномики, транскриптомики и протеомики позволят раскрыть сложные механизмы стимуляции процессов роста и развития растений при использовании нанотехнологий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Растения, выращенные в асептических условиях, отвечают современным требованиям к качеству посадочного материала. Наши исследования показывают, что посадочный материал, выращенный на питательной среде Мурасиге–Скуга, в которую вместо сульфата железа введены наночастицы железа, имеет улучшенные морфометрические и физиологические показатели за счет структурной перестройки. Благодаря совместному использованию био- и нанотехнологии получен посадочный материал с хорошо развитой и активной корневой системой и улучшенными морфометрическими и физиологическими показателями, что позволяет повысить урожайность плодов перца.

Авторы благодарят Министерство образования и науки РФ и сотрудников лаборатории ФИЦ ХФ РАН под руководством А.Н. Жигача за поддержку в проведении экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Loyola-Vargas V.M., Ochoa-Alejo N.* // *Methods Mol. Biol.* 2018. V. 1815. P. 3; [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8594-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8594-4_1)
2. Биотехнологии в сельском хозяйстве; <https://ekovse.ru/stati/biotehnologiya-i-selskoe-hozyaystvo/>

3. Александрова В.А., Фоторьянская А.М. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 12. С. 65; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21120025>
4. Герасимов Г.Н., Громов В.Ф., Иким М.И. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 11. С. 65; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21110030>
5. Писаренко Л.М., Касаикина О.Т., Иванов В.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 31; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20090095>
6. Григоренко Б.Л., Хренова М.Г., Кулакова А.М. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 13; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20060023>
7. Глуценко Н.Н., Богословская О.А., Ольховская И.П. // Хим. физика. 2002. Т. 21. № 4. С. 79.
8. Рахметова А.А., Алексеева Т.П., Богословская О.А. и др. // Рос. нанотехнол. 2010. Т. 5. № 3–4. С. 102.
9. Богословская О.А., Рахметова А.А., Овсянникова М.Н. и др. // Рос. нанотехнол. 2015. Т. 10. № 1–2. С. 93.
10. Рахметова А.А., Богословская О.А., Ольховская И.П. и др. // Рос. нанотехнол. 2015. Т. 10. № 1–2. С. 123.
11. Mittal D., Kaur G., Singh P. et al. // Front. Nanotechnol. 2020. V. 2. P. 579954; <https://doi.org/10.3389/fnano.2020.579954>
12. Dimkra C.O., Prem S., Bindraban P.S. // J. Agric. Food. Chem. 2018. V. 66. Issue 26. P. 6462; <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02150>
13. Dwivedi S., Saquib Q., Al-Khedhairi A.A. et al. // Understanding the Role of Nanomaterials in Agriculture / Eds. Singh, D., Singh, H., Prabha, R. Springer, New Delhi, 2016. P. 271; [https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_17)
14. Rameshaiah G.N., Pallavi J., Shabnam S. // Intern. J. Engineer. Res. Gen. Sci. 2015. V. 3. P. 314.
15. Tarafdar J.C., Xiong Y., Wang W.N. et al. // Appl. Biol. Res. 2012. V. 14. P. 138.
16. Delfani M., Baradarn F.M., Farrokhi N. et al. // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 2014. V. 45. P. 530; <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
17. Liu X., Zhang F., Zhang S. et al. // Plant Nutri. Ferti. Sci. 2005. V. 11. P. 385.
18. Yablokov A.G., Bogoslovskaya O.A., Olkhovskaya I.P. et al. // Amer. J. Chem. Soc. 2020. V. 14. № 07. P. 1140; <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.07.p.2366>
19. Чжао Х., Лю М., Чень Ю. и др. Способ выращивания растений с использованием наночастиц металлов и питательная среда для его осуществления: Патент RU 2 612 319 C1 // Б.И. 2017. № 7. С. 30.
20. Leipunsky I.O., Zhigach A.N., Kuskov M.L. et al. // J. Alloys Compd. 2019. V. 778. P. 271; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.088>
21. Zhao H., Liu., Chen Y. et al. // PCT Patent CN 108471713 B. 2020. Registration date 10.20.2020
22. Onanuga A.O., Jiang P., Adl S. // J. Agric. Sci. 2012. V. 4. № 3. P. 93; <https://doi.org/10.5539/jas.v4n3p93>
23. Lichtenthaler H., Buschmann C. // Handbook of Food Analytical Chemistry: Pigments, Colorants, Flavors, Texture and Bioactive Food Components / Eds. Wrolstad R.E., Acree T.E., Decker E.A. et al. Canada: John Wiley & Sons, 2005. P. 171.
24. Briat J.F., Dubos C., Gaymard F. // Trends Plant Sci. 2015. V. 20. P. 33; <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.005>
25. Li X., Yang Y., Gao B. et al. // PLoS One. 2015. V. 10. № 4. P. e0122884; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122884>
26. Alidoust D., Isoda A. // Acta Physiol. Plant. 2013. V. 35. P. 3365; <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1369-8>
27. Ghafariyan M.H., Malakouti M.J., Dadpour M.R. et al. // Environ. Sci. Technol. 2013. V. 47. P. 10645; <https://doi.org/10.1021/es402249b>
28. Jeyasubramanian K., Thoppey U.U.G., Hikku G.S. et al. // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 15451; <https://doi.org/10.1039/C5RA23425E>
29. Raju D., Mehta U.J., Beedu S.R. // IET Nanobiotechnol. 2016. V. 10. P. 141.
30. Rui M., Ma C., Hao Y. et al. // Front. Plant. Sci. 2016. V. 7. P. 815; <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00815>
31. Gonçalves S., Mansinhos I., Solana R.R. et al. // Molecules. 2021. V.26. № 21. P. 6427; <https://doi.org/10.3390/molecules26216427>
32. Yuan J., Chen Y., Li H. et al. // Sci. Rep. 2018. V. 8. № 1. P. 3228; <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18055-w>
33. Sheykhbaglou R., Sedghi M., Shishevan M.T. et al. // Notulae Scientia Biologicae. 2010. V. 2. № 2. P. 112; <https://doi.org/10.15835/nsb224667>
34. Trujillo-Reyes J., Majumdar S., Botez C.E. et al. // J. Hazard. Mater. 2014. V. 267. P. 255; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.11.067.20>
35. Kim J.H., Lee Y., Kim E.J. et al. // Environ. Sci. Technol. 2014. V. 48. № 6. P. 3477; <https://doi.org/10.1021/es4043462>