

О ВЛИЯНИИ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА НА РАСТЕНИЯ В ВЕГЕТАТИВНЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ

Г. Г. Панова¹, О. А. Шилова^{2,3}, А. М. Николаев², А. С. Коваленко², О. Р. Удалова¹, Л. М. Аникина¹,
А. С. Журавлева¹, Ю. В. Хомяков¹, В. Е. Вертебный¹, В. И. Дубовицкая¹

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

E-mail: gaiane@inbox.ru;

²Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС)
199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 2;

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)
197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5
E-mail: olgashilova@bk.ru; ltp@rambler.ru

Поступила в редакцию 10 августа 2019 г. принята к печати 28 августа 2019 г.

Методом химического осаждения синтезирован магнитный нанопорошок оксида железа с размером наночастиц ~10 нм, соответствующий по составу твердому раствору маггемит-магнетит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$). В серии лабораторных и вегетационных экспериментов в регулируемых условиях интенсивной светокультуры установлено, что водные суспензии полученного нанопорошка в концентрациях 0,01 и 0,001 мг л⁻¹ оказывают наиболее выраженное стимулирующее влияние на показатели роста растений как после обработки семян кресс-салата, так и при некорневом воздействии на растения огурца и салата в вегетативный период развития. Стимуляция роста растений огурца и салата под действием суспензий наночастиц оксида железа преимущественно обусловлена усилением процессов обмена и поступления необходимых для растений элементов питания в надземную часть, а также активизацией синтеза фотосинтетических пигментов хлорофиллов.

Ключевые слова: наночастицы оксида железа, маггемит, магнетит, семена, некорневая обработка, рассада, кресс-салат, салат, огурец, рост, нетто-продуктивность, химический состав надземной части растений, хлорофиллы, каротиноиды, микроэлементы железо, медь, марганец, цинк.

ON THE IMPACT OF IRON OXIDE NANOPARTICLES ON PLANTS IN THE VEGETATIVE PERIOD OF DEVELOPMENT

Panova G. G.¹, Shilova O. A.^{2,3}, Nikolaev A. M.², Kovalenko A. S.², Udalova O. R.¹, Anikina L. M.¹, Zhuravleva A. S.¹,
Khomyakov Yu. V.¹, Vertebnyi V. E.¹, Dubovitskaya V. E.¹

¹ Agrophysical Research Institute, 14 Grazhdansky pr, St. Petersburg, 195220, Russia
E-mail: gaiane@inbox.ru;

² Institute of Silicate Chemistry, Russian Academy of Sciences
nab. Makarova, 2, Saint-Petersburg, 199034, Russia;

³ Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
ul. Prof. Popova, 5, Saint-Petersburg, 197376, Russia
E-mail: olgashilova@bk.ru; ltp@rambler.ru

With the method of chemical deposition, a magnetic nanosized iron oxide with nanoparticle size of ~ 10 nm was synthesized, corresponding to the composition of the maghemite-magnetite solid solution ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$). In a series of laboratory and field experiments under controlled conditions of intensive light culture, it was found that aqueous suspensions of this iron oxide nanopowder at concentrations of 0.01 and 0.001 mg l⁻¹ had the most pronounced stimulating effect on plant growth indicators after treatment of watercress seeds and also after non-root treatment of cucumber and lettuce plants during their development. Stimulation of cucumber and lettuce plants growth under the influence of suspensions of iron oxide nanoparticles is mainly due to increased metabolic processes and application of nutrients necessary for plants through above-ground part, as well as due to activation of photosynthetic pigments (chlorophylls) synthesis.

Keywords: iron oxide, nanoparticles, maghemite, magnetite, seeds, non-root treatment, watercress, salad, cucumber, growth, net productivity, chlorophylls, carotenoids, trace elements iron, copper, manganese, zinc.

Высокая потребность АПК в экологически безопасных биодegradуемых препаратах комплексного положительного действия на растения

определяет актуальность поиска и разработки новых форм, обеспечивающих направленную регуляцию процессов роста и развития, а также транспортировку

в растения макро- и микроэлементов и физиологически активных соединений, обладающих свойствами адаптогенов и протекторов. Перспективными источниками получения таких препаратов могут служить нанодисперсные материалы, содержащие микроэлементы. В настоящее время во всем мире активно ведутся исследовательские работы, направленные на создание таких материалов и препаратов на их основе, а также на изучение механизмов их влияния на растения и окружающую среду (Забегалов, Дабахова, 2011; Аникина и др., 2015; Панова и др., 2018; Шилова и др., 2018). На рынке уже появился ряд нанопрепаратов, например, микроудобрение «Наноплант – Co, Mn, Cu, Fe» (Беларусь), Nano-Gro, Green Lift (США). В основном они представляют собой гидратированные и карботированные наночастицы биогенных металлов или неионные коллоидные растворы наночастиц металлов и других микроэлементов (Huang et al., 2015). По сравнению с солями наночастицы микроэлементов быстрее проникают через мембрану клетки, эффективны в более низких концентрациях и значительно менее токсичны благодаря электронейтральности, наноразмеров (1–100 нм) и более высокой реакционной способности. Однако диапазон концентраций, в которых они положительно действуют на растения и безопасны для человека, является довольно узким (Забегалов, Дабахова, 2011; Palmqvist et al., 2017).

Среди выявленных исследователями позитивных эффектов влияния наночастиц металлов (железа, алюминия, меди, золота, серебра, цинка и др.) на растения можно выделить фотокаталитическую активность, стимулирование прорастания семян и скорости роста, повышение содержания хлорофиллов и увеличение продуктивности (Tripathi et al., 2017). В литературе также имеется информация о том, что наночастицы способны оказывать угнетающее действие на растения, выраженное в снижении интенсивности роста и активности фотосинтеза, нарушении водного обмена, гормонального баланса, процессов метаболизма и обеспечения кислородом, а также в увеличении чувствительности к природным токсинам и др. (Morales-Diaz et al., 2017).

Исследователи отмечают множественность механизмов влияния наночастиц на растения и сложность регуляции их поведения в окружающей среде, что свидетельствует о необходимости изучения взаимодействия тестируемых наночастиц с конкретными культурами (Tripathi et al., 2017).

Представленная работа посвящена изучению влияния на растения новой формы синтезированных авторами наночастиц оксида железа – твердого раствора маггемит–магнетит. Как известно, железо играет важную роль в жизнедеятельности растений и других живых организмов, включая человека (Marschner, 1995; Balk, Schaedler, 2014). Основные функции железа в растениях заключаются преимущественно в участии его двухвалентной и трехвалентной формы в обратимых окислительно-восстановительных реакциях и реакциях переноса электронов, включая электронтранспортные цепи процессов дыхания и фотосинтеза (Marschner, 1995;

Hell, Stephan, 2003). Несмотря на то, что железо является четвертым по распространенности элементом в земной коре, его доступность растениям зачастую является ограниченной из-за умеренной или даже низкой растворимости в почвах, особенно в щелочных почвах, обогащенных кальцием. Дефицит железа в растениях прежде всего проявляется в виде хлороза молодых листьев и является одним из наиболее существенных факторов, определяющих урожайность множества сельскохозяйственных культур (Vose, 1982). Дефицит железа в организме человека вызывает различные нарушения здоровья (включая анемию и сбой иммунной системы) (Kahrariyan et al., 2013). Почти половина населения Земли подвержена дефициту Fe. Это связано как с низким разнообразием продуктов питания, так и с невысокой биодоступностью железа, в т.ч. при применении лекарственных средств (Welch, Graham, 2004). Увеличение содержания Fe в сельскохозяйственных культурах в определенном диапазоне нетоксичных концентраций может способствовать решению проблемы дефицита железа. Кроме того, получение данного микроэлемента через продукты питания может увеличить его биодоступность.

Исследователи отмечают, что основными формами железа, используемыми в сельском хозяйстве, являются оксиды FeO_x (Morales-Diaz et al., 2017) или Fe_2O_3 (Palmqvist et al., 2017; Tripathi et al., 2017). В частности, весьма широко применяются нанопорошки маггемита – магнитной модификации $\gamma-Fe_2O_3$.

Следует отметить, что нанопорошки маггемита стали применяться для решения различных прикладных задач, таких как очистка воды от нефтепродуктов (Лютюев и др., 2016), а также для биомедицинских целей в качестве контрастных агентов для магнитно-резонансной томографии, гипертермии и направленной доставки лекарств (Mahmoudi et al., 2011) намного раньше и обширнее, чем их в агротехнологиях. Возможности применения наночастиц маггемита в агротехнологиях стали изучаться лишь в последние годы (Tripathi et al., 2017). Следует отметить, что наиболее активно в исследования по использованию наночастиц и наноконструкций на их основе включились ученые из стран с засушливым или холодным климатом (Kahrariyan et al., 2013; Nazari et al., 2014; Janmohammadi et al., 2016 – Иран; Voropaeva et al., 2012, 2014 – Израиль, руководитель – профессор Oleg L. Figovsky, International Nanotechnology Research Centre «Polymate» (<http://www.polymateltd.com/>); Palmqvist et al., 2017 – Швеция, руководитель – профессор Vadim Kessler, Swedish University of Agricultural Sciences, Уппсала).

С учетом перспективности применения маггемита в целом ряде прикладных областей расширяется научная и практическая значимость исследований по разработке методов его синтеза, а также по изучению его структуры и свойств. Это особенно актуально в связи с тем, что недавно была подтверждена его низкая токсичность при применении в медицинских целях (Kuchma et al., 2017). Данный факт позволяет предположить, что использование

маггемита в агротехнологиях не нанесет вреда окружающей среде и в конечном итоге получаемой сельскохозяйственной продукции.

На перспективность использования в растениеводстве как маггемита, так и магнетита указывают авторы (Palmqvist et al., 2017). Они же предлагают повысить ферментативную активность маггемита за счет его легирования иттрием. Результатом их исследований является повышение устойчивости рапса к засухе.

Другим способом улучшения биосовместимости наночастиц оксидов железа, который рассматривается в литературе (Mahmoudi, 2011), является создание особой архитектуры поверхности наночастиц – синтез конъюгатов суперпарамагнитных наночастиц оксида железа за счет соединения с различными лигандами и белками.

Таким образом, перспективы разработки и применения в агротехнологиях эффективных и экологически безопасных препаратов на основе магнитных кристаллических модификаций оксидов железа (маггемита и магнетита), а также их композитов

и конъюгатов с углеродными материалами, органическими веществами и веществами природного происхождения прежде всего связаны с установлением взаимосвязей типа «состав» – «структура» – «концентрационные соотношения» – «свойства» – «эффекты на биообъекты», позволяющих однозначно определить и оптимизировать параметры синтеза данных материалов, обеспечивающих получение структур и композиций с необходимыми функциональными характеристиками

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния синтезированных авторами наночастиц оксидов железа (твердого раствора маггемит–магнетит) на рост, развитие, процессы биосинтеза, нетто-продуктивность и элементный состав растений на примере огурца и салата.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Наночастицы оксида железа были получены методом химического осаждения солей в водном растворе. Схема синтеза представлена на рис. 1.

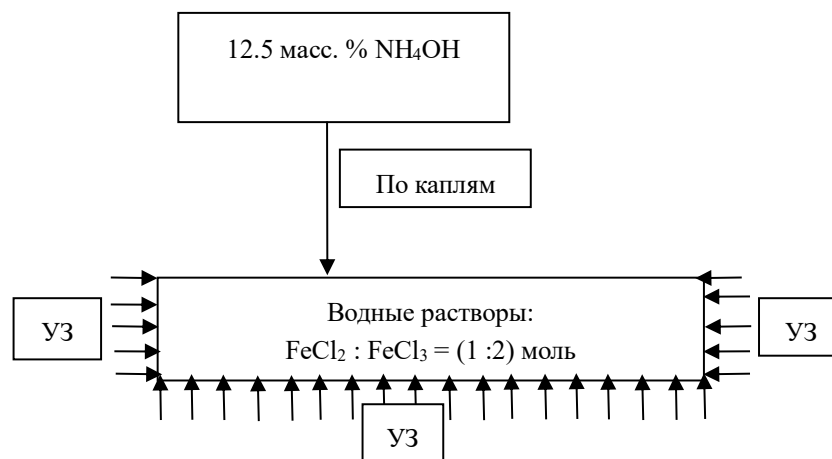


Рис. 1. Схема синтеза нанопорошка оксида железа методом химического осаждения с использованием ультразвукового воздействия

Использовались водные растворы хлоридов железа (II) и (III) в мольном соотношении 1 к 2. В полученный раствор по каплям добавлялся 12,5% водный раствор аммиака. При этом емкость с раствором хлоридов железа устанавливалась в ультразвуковой ванне, так что синтез оксида железа происходил под воздействием ультразвука. Полученный осадок отделялся от маточного раствора магнитной сепарацией с использованием неодимового магнита и промывался дистиллированной водой. Высушенный порошок подвергался термообработке при температуре 100°C.

Для оценки фазового состава полученного порошка применялся рентгенофазовый анализ, который проводился на порошковом рентгеновском дифрактометре D8-Advance «Bruker» (CuK α -излучение). Для расшифровки дифрактограмм использовался банк данных (<http://database.iem.ac.ru/mincryst/rus/search.php>).

Микроструктура нанопорошков определялась при помощи сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения Carl Zeiss NVision 40,

оснащенного детектором Oxford Instruments X-MAX (80 мм²). СЭМ-изображения были получены с помощью детектора Everhart-Thornley (SE2) при ускоряющем напряжении 1 кВ.

Оценка влияния синтезированных наночастиц оксида железа на растения проводилась на базе ФГБНУ АФИ в лабораторных условиях и на биополигоне в регулируемых условиях. Объектами исследования являлись адаптированные к условиям интенсивной светокультуры сорта и гибриды овощных культур: огурец гибрида F₁ Нева, листового салата сорта Тайфун и кресс-салат сорта Ажур, семена которых получены из коллекций отечественных селекционно-семеноводческих компаний Гавриш и Сортсеменовощ.

Изучение биологической активности суспензии наночастиц оксида железа включало определение ее влияния в широком диапазоне концентраций на энергию прорастания и всхожесть семян кресс-салата сорта Ажур, а также на биометрические характеристики роста его проростков на 7-е сутки от замачивания семян. Семена кресс-салата в вариантах опыта проращивались в чашках Петри диаметром

10 см на фильтровальной бумаге, смоченной 10 мл водной суспензии тестируемого вещества. В контрольном варианте семена проращивались на дистиллированной воде. На 3-й день от замачивания определялась энергия прорастания семян, на 7-й день – их всхожесть, также измерялась длина ростков и корней проростков. Исследования выполнены в соответствии с общепринятыми методами и правилами Международной ассоциации тестирования семян (ISTA) (ГОСТ 12038-84, 1985; Hartmann et al., 1997; ISTA, 2016). Все эксперименты проведены в 3-кратной повторности.

Оценка влияния некорневой обработки суспензиями наночастиц оксида железа различной концентрации проводилась в серии экспериментов в период вегетативного роста растений салата (сорт Тайфун) и огурца (гибрид F₁ Нева). Растения выращивались в вегетационной светоустановке (Желтов, Панова, 2011), оснащенной подъемными по вертикальной оси световыми блоками, содержащими источники света – газоразрядные зеркализированные натриевые лампы ДНаЗ-400 (Россия). Облученность на полезной площади в области ФАР (фотосинтетически активной радиации) составляла 80–90 Вт м⁻², продолжительность светового периода – 14 ч. Рассада салата была высажена в лотки, огурца – в емкости объемом 0,7 л. Растения выращивались на малообъемном аналоге почвы «Агрофит» (Ермаков и др., 1997) с обеспечением питательным раствором Кнопа (Чесноков и др., 1960) методом капельного полива. Температура воздуха поддерживалась в пределах +22...+24°C днем и +18...+20°C ночью, относительная влажность воздуха – на уровне 65–75%. Количество растений салата составляло 5 шт./лоток, огурца – 1 шт./емкость, повторность – 20 растений в варианте опыта. Некорневая обработка растений водной суспензией наночастиц оксида железа в

концентрациях 0,001–1 мг л⁻¹ проводилась три раза с периодичностью 5 суток на протяжении стадий развития 3–5-ти настоящих листьев у огурца и 4–8-ми листьев у салата. В контрольном варианте осуществлялась обработка растений водой. Уборка растений проводилась на стадии развития 6-ти листьев у огурца и 10–11-ти листьев у салата. Вегетационные эксперименты проведены в 2-кратной повторности.

При уборке учитывались высота растений, число и размеры листьев, площадь листовой поверхности, сырая и сухая масса надземной части растений, а также процентное содержание сухого вещества.

Биохимический состав растений, а именно содержание в листьях пигментов хлорофиллов и каротиноидов, а также микроэлементов (железа, меди, марганца и цинка), определялся в Испытательной лаборатории ФГБНУ АФИ, аккредитованной на техническую компетентность и независимость. Определения проводились в соответствии с требованиями современных нормативных документов по общепринятым методикам (Тутельян, Беляев, 2001; Методы..., 1987; Руководство..., 1998).

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программ Excel 2010 и Statistica 8 («Stat-Soft, Inc.», США). Определялись средние значения изучаемых показателей, доверительные интервалы и коэффициенты вариации. Достоверность различий между вариантами оценивалась при помощи методов параметрической статистики (t-критерий Стьюдента). Различия между вариантами считались достоверными при $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена рентгенограмма полученного порошка оксида железа.

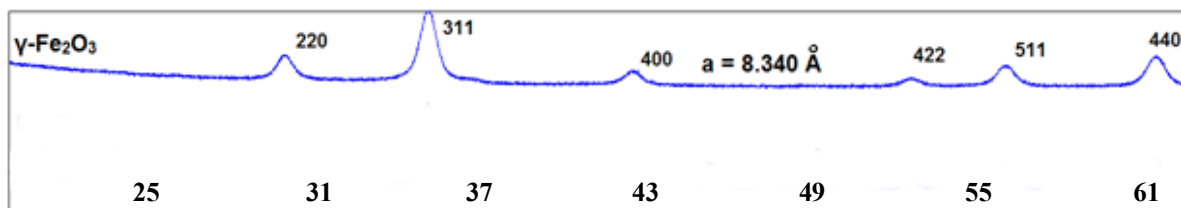


Рис. 2. Рентгенограмма порошка оксида железа

Результаты рентгеновской дифракции показали, что полученные порошки соответствуют по составу магнитной модификации оксида железа – маггемиту γ -Fe₂O₃. Как видно из рис. 2, рефлексы на рентгенограмме являются широкими, что свидетельствует о том, что это наночастицы. Однако рассчитанные по рентгенограммам параметры элементарной ячейки $a = 8,340$ показывают, что полученные порошки представляют собой твёрдые

растворы магнетита-маггемита. Учитывая зависимость параметров элементарной ячейки от соотношения магнетита и маггемита, можно констатировать, что в результате синтеза были получены твёрдые растворы из середины ряда (маггемит 8,336 Å; магнетит 8,396 Å), что согласуется с данными исследования (Nazari et al., 2014). СЭМ-изображение порошка представлено на рис. 3.

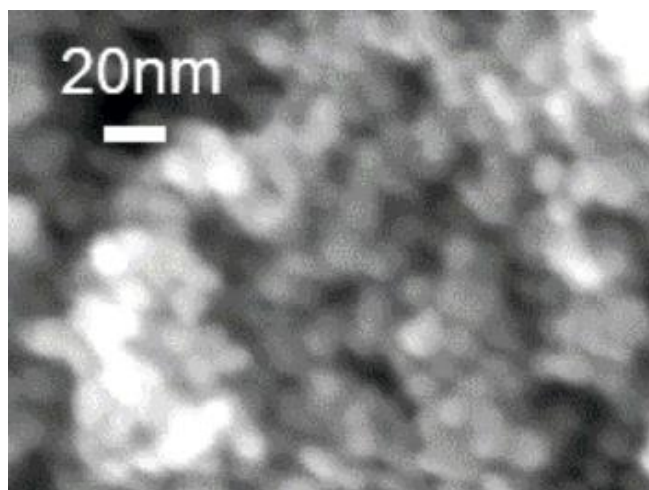


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности порошка оксида железа

Как видно из рис. 3, частицы полученного нанопорошка достаточно однородны по размеру (~10 нм).

Таким образом, для приготовления суспензий использовался нанопорошок, соответствующий по составу твердому раствору маггемит-магнетит с размером частиц 10 нм. Суспензии полученного порошка с широким диапазоном концентраций (0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100 мг л⁻¹) были изготовлены с использованием воды.

Оценка результатов обработки семян кресс-салата сорта Ажур водными суспензиями оксида железа ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4$) в диапазоне концентраций 0,0001–100 мг л⁻¹ позволила выявить (табл. 1):

- отсутствие достоверного влияния на энергию прорастания и всхожесть семян;
- существенное положительное влияние порошка оксида железа на рост ростков и корней при концентрациях 0,01 и 0,001 мг л⁻¹, только ростков – при

концентрации 0,0001 мг л⁻¹, в виде тенденции – при концентрациях 0,1 – 10 мг л⁻¹;

– тенденцию к торможению роста ростков и корней в вариантах с обработкой суспензией оксида железа в концентрации 100 мг л⁻¹.

На основании полученных результатов был выбран оптимальный диапазон концентраций водных суспензий оксида железа (0,001–1,0 мг л⁻¹) для некорневой обработки растений.

Некорневая обработка растений салата (сорт Тайфун) и рассады огурца (гибрид F₁ Нева) суспензиями наночастиц оксида железа в указанных выше концентрациях способствовала достоверному или в виде тенденции повышению массы надземной части растений, что было связано в том числе с увеличением высоты растений, а также количества листьев, их размеров и площади (табл. 2). Наиболее отчетливо указанные изменения проявились в варианте с обработкой растений суспензией оксида железа в концентрации 0,01 мг л⁻¹.

Таблица 1. Влияние суспензии наночастиц оксида железа различной концентрации на энергию прорастания и всхожесть семян кресс-салата сорта Ажур, а также ростовые характеристики его семидневных проростков

Концентрация водной суспензии наночастиц оксида железа, мг/л	Энергия прорастания		Всхожесть		Длина ростка		Длина корня	
	%	% от контроля	%	% от контроля	см	% от контроля	см	% от контроля
0 (контроль)	95	100	97	100	3,6±0,1	100	8,2±0,5	100
100	95	100	96	99	3,2±0,1	89	7,1±0,3	87
10	96	101	97	100	3,7±0,1	103	8,7±0,5	106
1	92	97	93	96	3,8±0,1	106	9,0±0,5	110
0,1	95	100	96	99	3,8±0,1	106	9,0±0,5	110
0,01	95	100	95	98	3,9±0,1*	108*	9,5±0,5*	116*
0,001	96	101	97	100	3,9±0,1*	108*	10,5±0,5*	128*
0,0001	95	100	95	98	3,9±0,1*	108*	8,0±0,4	98

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости

Таблица 2. Влияние некорневой обработки суспензией наночастиц оксида железа (НЧ ож) различной концентрации на показатели роста и нетто-продуктивности растений салата и огурца при выращивании их в регулируемых условиях интенсивной светокультуры

Вариант некорневой обработки	Высота		Число листьев		Площадь		Сырая масса		Сухая масса		Сухое вещество	
	см	% от контроля	шт.	% от контроля	см ²	% от контроля	г	% от контроля	г	% от контроля	%	% от контроля
Салат												
Вода (контроль)	14,7±0,8	100	9,2±0,4	100	835±43	100	14,9±1,0	100	0,89±0,04	100	6,0	100
НЧ ож, 0,001 мг л ⁻¹	16,6±0,7*	113*	9,8±0,7	107	867±32	104	16,6±2,6	111	1,03±0,04*	116*	6,2	103
НЧ ож, 0,01 мг л ⁻¹	17,7±0,8*	120*	10,2±0,4*	111*	948±44*	114*	18,1±2,1*	122*	1,07±0,03*	120*	5,9	98
НЧ ож, 0,1 мг л ⁻¹	18,0±0,0*	122*	9,4±0,7	102	942±56*	113*	16,8±2,6	113	1,00±0,06*	112*	6,0	100
НЧ ож, 1 мг л ⁻¹	16,7±1,0*	114*	10,2±0,7	111	968±48*	116*	17,3±1,9	116	1,02±0,04	115*	5,9	98
Огурец												
Вода (контроль)	39,0±2,0	100	7,6±0,4	100	1964±67	100	63,8±4,0	100	3,75±0,22	100	5,9	100
НЧ ож, 0,001 мг л ⁻¹	44,0±2,0*	113*	8,0±0,0*	105*	2223±101*	113*	68,7±4,8	108	4,16±0,20	111	6,1	103
НЧ ож, 0,01 мг л ⁻¹	53,0±3,0*	136*	8,0±0,0*	105*	2674±76*	136*	83,4±5,4*	131*	4,76±0,20*	127*	5,7	97
НЧ ож, 0,1 мг л ⁻¹	46,0±2,5*	118*	7,3±0,2	96	2009±92	102	68,5±5,2	107	3,86±0,20	103	5,6	95
НЧ ож, 1 мг л ⁻¹	52,3±3,0*	134*	7,9±0,2	104	2080±84	106	71,9±4,6	113	4,01±0,22	107	5,6	95

Примечание: * – значение достоверно отличается от контрольного на 5%-ном уровне значимости; НЧ ож – водная суспензия наночастиц оксида железа

Возможными механизмами отмеченного положительного влияния некорневой обработки суспензиями оксида железа на показатели роста растений являются:

– увеличение поступления в надземную часть обработанных растений минеральных элементов питания, в том числе цинка и марганца, на что указывает достоверное повышение содержания в растениях указанных элементов и сырой золы (рис. 4);

– выраженная тенденция к увеличению оводненности тканей стеблей и листьев после обработки суспензиями оксида железа, что, в свою очередь, косвенно свидетельствует об их более высоком осмотическом потенциале, обусловленном накоплением низкомолекулярных соединений (табл. 2, рис. 4). Для изучения отмеченного эффекта в дальнейшем планируется провести эксперименты по исследованию влияния суспензий оксидов железа на стрессоустойчивость растений в условиях почвенной засухи;

– увеличение содержания хлорофиллов в листьях растений, наиболее отчетливо проявившееся в вариантах с их обработкой суспензиями оксида железа в концентрациях 0,01 и 0,001 мг л⁻¹ (рис. 4). В вариантах с более высокой концентрацией содержание хлорофиллов в листьях не отличалось от аналогичных показателей в контрольном варианте. Следует отметить различия в направленности изменений содержания каротиноидов в растениях огурца и салата после обработки суспензиями оксида железа в различных концентрациях. Так, изменения количества каротиноидов, происходящие в листьях огурца, аналогичны изменениям содержания хлорофиллов с максимумами значений при обработке суспензиями оксидом железа в низких концентрациях и их снижением при концентрациях 0,1 и 1 мг л⁻¹, однако изменения содержания каротиноидов наиболее значительны по отношению к контролю (на 18%). В листьях салата под влиянием обработки суспензиями оксида железа во всем диапазоне тестируемых концентраций отмечается достоверное или в виде тенденции снижение на 13–28% содержания каротиноидов. Как известно, хлорофиллы, а и b, а также каротиноиды являются пигментами, задействованными в процессах фотосинтеза и/или окислительно-восстановительных процессах, а микроэлемент железо катализирует образование предшественников пигмента хлорофилла а – аминолевулиновой кислоты и протопорфиринов. Кроме того, соединения железа задействованы в образовании компонентов хлоропластов: цитохромы, ферредоксин и др. По всей видимости, с увеличением концентрации суспензий наночастиц железа при некорневой обработке растений снижается необходимость синтеза вторичных метаболитов, в том числе ряда пигментов, обеспечивающих усиление поглощения данного микроэлемента корневой системой. Отмеченное явление требует дополнительного углубленного изучения.

Таким образом, стимуляция роста растений огурца и салата в результате некорневой обработки водными суспензиями магнитного нанопорошка оксида железа преимущественно обусловлена

усилением процессов обмена и поступления необходимых растениям элементов питания в надземную часть.

Усиление питания и повышение содержания минеральных элементов в растениях способствуют увеличению осмотического потенциала и, как следствие, оводненности тканей за счет поступления воды в клетки с повышенным осмотическим потенциалом. Данный положительный эффект может свидетельствовать о способности магнитных наночастиц оксидов железа повышать устойчивость растений к засухе.

Очевидно, что железо как кофактор множества ферментов задействовано в большом количестве метаболических процессов, происходящих в растениях. Поэтому дальнейшее изучение механизмов влияния на растения магнитных наночастиц оксидов железа в разных кристаллических модификациях представляет значительный интерес.

ВЫВОДЫ

Методом химического осаждения с использованием ультразвукового воздействия синтезированы нанопорошки оксида железа с размером наночастиц ~10 нм, соответствующие по составу твердому раствору маггемит – магнетит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$). На их основе были приготовлены водные суспензии в широком диапазоне концентраций (0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100 мг л⁻¹) для предпосевной обработки семян и некорневой обработки растений.

В серии лабораторных и вегетационных экспериментов в регулируемых условиях интенсивной светокультуры определено влияние водных суспензий, синтезированных наночастиц оксида железа размером ~10 нм на растения кресс-салата на начальных этапах их развития, а также огурца и салата в период их вегетативного роста. Установлено, что водные суспензии нанопорошка твердого раствора маггемита-магнетита в концентрациях 0,01 и 0,001 мг л⁻¹ оказывают наиболее выраженное стимулирующее влияние на показатели роста растений как после обработки семян кресс-салата, так и при некорневом воздействии на растения огурца и салата в период вегетативного развития. Стимуляция роста растений огурца и салата под действием синтезированного магнитного нанопорошка оксида железа преимущественно обусловлена усилением процессов обмена и поступления необходимых растениям элементов питания в надземную часть, а также активизацией синтеза фотосинтетических пигментов хлорофиллов.

Полученные данные свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения механизмов влияния наночастиц оксидов железа на растения с целью создания высокоэффективных нанопрепаратов и технологии их применения в растениеводстве открытого и защищенного грунта, направленной на повышение устойчивости растений к стрессовым факторам и увеличение эффективности реализации их продукционного потенциала.

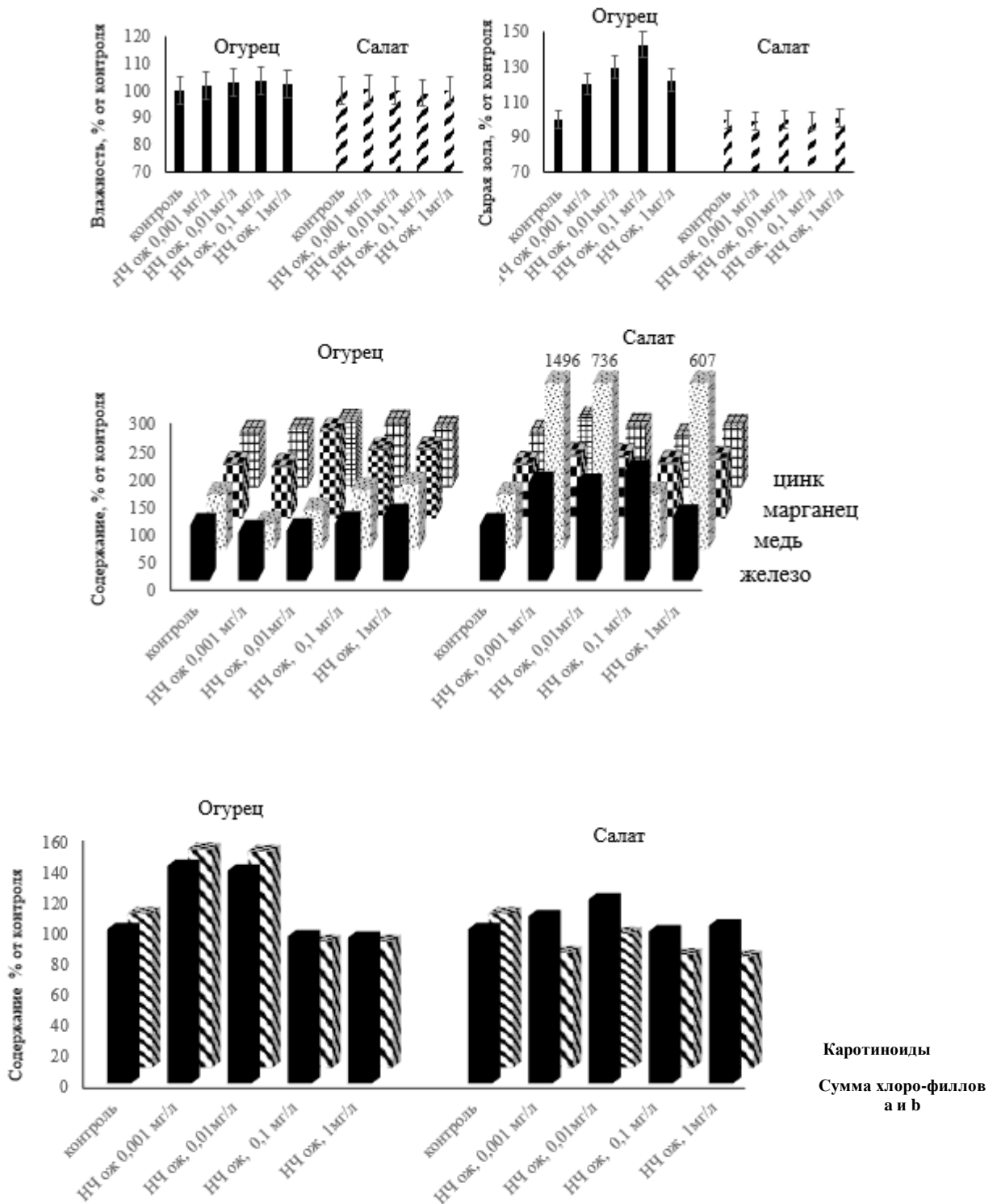


Рис. 4. Влияние некорневой обработки водной суспензией наночастиц оксида железа (НЧ ож) различной концентрации на биохимические показатели растений салата и огурца при выращивании их в регулируемых условиях интенсивной светокультуры

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект 19-13-00442.

Список литературы

- Аникина Л.М., Якушев В.В., Синявина Н.Г., Панова Г.Г., Чарыков Н.А., Кескинов В.А., Кескинова М.В., Семенов К.Н. Комплексное микроудобрение и способ его получения / Патент на изобретение РФ № 2541405. 2015. Бюл. № 4.
- ГОСТ 12038-84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М., 1985. 58 с.
- Ермаков Е.И., Желтов Ю.И., Мильто Н.Е., Кучеров В.И. Почвогрунт для выращивания растений «Агрофит» / Патент № 2081555 РФ. 1997. БИ № 17.
- Желтов Ю.И., Панова Г.Г. Устройство для выращивания растений / Патент на полезную модель № 108705. 2011. Бюл. № 27.
- Забегалов Н.В., Дабахова Е.В. Влияние кремнийсодержащего нанопрепарата на урожайность и содержание кремния в зерновых культурах // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 12. С. 22–24.
- Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П. и др. Методы биохимического исследования растений / Под ред. А.И. Ермакова. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1987. 430 с.
- Лютеев А.А., Смирнов Ю.Г. Разработка технологической схемы очистки сточных вод от нефтяных загрязнений с использованием магнитных наночастиц // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2013. № 4. С. 424–435. (Электронный ресурс: <http://www.ogbus.ru>).
- Панова Г.Г., Семенов К.Н., Шилова О.А., Корнюхин Д.Л., Шпанев А.М., Аникина Л.М., Хамова Т.В., Артемьева А.М., Канаш Е.В., Чарыков Н.А., Удалова О.Р., Галушко А.С., Журавлева А.С., Филиппова П.С., Кудрявцев Д.В., Блохина С.Ю. Влияние углеродных и кремнезольных наноматериалов на устойчивость ярового ячменя к заболеванию корневыми гнилями // Агрофизика. 2018. № 3. С. 48–58.
- Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов / Рос. акад. мед. наук. Ин-т питания / Под ред. профессоров чл.-кор. МАИ И. М. Скурихина, акад. В. А. Тутельяна. М.: Брандес : Медицина, 1998. 341 с.
- Тутельян В.А., Беляев Е.Н. СанПиН 2.3.2.1078-01. 2001.
- Чесноков В.А., Базырина Е.Н., Бушуева Т.М. Выращивание растений без почвы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1960. 170 с.
- Шилова О.А., Хамова Т.В., Панова Г.Г., Аникина Л.М., Артемьева А.М., Кирюхин Д.Л. Использование зольгель технологии для обработки семян ячменя // Физика и химия стекла. 2018. Т. 44. № 1. С. 39–47. DOI:10.1134/S108765961801011X
- Balk J., Schaedler T.A. Iron cofactor assembly in plants // *Ann. Rev. Plant Biol.*, 2014, no. 65, pp. 125–153.
- Hartmann H.T., Kester D.E., Davies F.T., Geneve R.L. *Plant propagation: Principles and Practices*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ, 6th edn. 1997.
- Hell R., Stephan U.W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants // *Planta*, 2003, no. 216, pp. 541–551.
- Huang S., Wang L., Liu L. et al. Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China. A review // *Agron. Sustain. Dev.*, 2015, no. 35, 369 p. (<https://doi.org/10.1007/s13593-014-0274-x>).
- ISTA, *International Rules for Seed Testing*. 2016. DOI: 10.15258/istarules.
- Janmohammadi M., Amanzadeh T., Sabaghnia N., Dashti S. Impact of foliar application of nano micronutrient fertilizers and titanium dioxide nanoparticles on the growth and yield components of barley under supplemental irrigation // *Acta Agriculturae Slovenica*, 2017, v. 107, no. 2, pp. 265–276. DOI: 10.14720/aas.2016.107.2.01
- Kahrariyan B., Yeganehpour F., Beyginiya V., Samadiyan F. Effect of Fe foliar application on morphological and physiological traits of different dryland wheat cultivars // *Int. J. Adv. Biolog. Biomed. Res.*, 2013, no.1(12), pp. 1583–1589.
- Kuchma Elena A., Zolotukhin Peter V., Belanova Anna A., Soldatov Mikhail A., Lastovina Tatiana A., Kubrin Stanislav P., Nikolsky Anatoliy V., Mirmikova Lidia I., Soldatov Alexander V. Low toxic maghemite nanoparticles for theranostic applications // *International Journal of Nanomedicine*, 2017, no. 12, pp. 6365–6371.
- Mahmoudi M., Sant S., Wang B., Laurent S., Sen T. Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs): Development, surface modification and application in chemotherapy // *Advanced Drug Delivery Review*, 2011, v. 63, pp. 24–46.
- Marschner H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2th edn., London: Academic Press, 1995, 328 p.
- Morales-Diaz A.B., Ortega-Ortiz H., Juarez-Maldonado A., Cadenas-Pliego G., Gonzalez-Morales S., Benavides-Mendoza A. Application of nanoelements in plant nutrition and its impact in ecosystems // *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.*, 2017, no. 8, pp. 1–13.
- Nazari M., Ghasemi N., Maddah H. et al. Synthesis and characterization of maghemite nanopowders by chemical precipitation method // *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2014, no. 6, pp. 1–5.
- Palmqvist N.G.M., Seisenbaeva G.A., Svedlindh P., Kessler V.G. Maghemite nanoparticles acts as nanozymes, improving growth and abiotic stress tolerance in *Brassica napus* // *Nanosc. Res. Lett.*, 2017, no. 12, 631 p. DOI: 10.1186/s11671-017-2404-2.
- Tripathi D.K., Gaur S.S., Singh S., Pandey R., Singh V.P., Sharma N.C., Prasad S.M., Dube N.K., Chauhan D.K. An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity // *Plant Physiology. Biochem.*, 2017, v. 110, no. 2, pp. 2–12. DOI: 10.1007/s00709-018-1281-6.
- Voropaeva N., Karpachev V., Varlamov V., Figovsky O. Influence of efficient, multicomponent, polyfunctional, physiologically active (nano) chips with herbicide activity on rice crop growth, development, yield and on weed growth inhibition // *Int. Lett. Chem., Phys. Astron.*, 2014, no. 7, pp. 62–68.

- Vose P.B. Iron nutrition in plants: a world overview // *J. Plant Nutr.*, 1982, no. 5, pp. 233–249.
- Voropaeva N., Figovsky O., Ibraliu A. et al. Innovative nanotechnology for agriculture // *Scientific Israel – Technolog. Adv.*, 2012, no. 14 (1), pp. 98–105.
- Welch R.M., Graham R.D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective // *J. Experimen. Botany.*, 2004, no. 55, pp. 353–364.

References

- Anikina L.M., Yakushev V.V., Sinyavina N.G., Panova G.G., Charykov N.A., Keskinov V.A., Keskinova M.V., Semenov K.N. Kompleksnoe mikroudobrenie i sposob ego polucheniya [Complex microfertilizer and method for its production] / *Patent RF na izobretenie. 2541405*. 2015. Bl. 4.
- GOST 12038-84 Semena sel'skohozyaistvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vshozhesti* [Seeds of crops. Methods for determining germination]. Moscow, 1985. 58 p.
- Ermakov E.I., Zheltov Yu.I., Mil'to N.E., Kucherov V.I. Pochvogrunt dlya vyrashivaniya rastenii «Agrofit» [Soil for growing plants "Agrofit"] / *Patent RF 2081555*. 1997. Bl. 17.
- Zheltov Yu.I., Panova G.G. Ustroistvo dlya vyrashivaniya rastenii [Plant Growing Device] / *Patent RF na poleznuyu model 108705*. 2011. Bl. 27.
- Zabegalov N.V., Dabakhova E.V. Vliyanie kremniisoderzhashego nanopreparata na urozhainost' i sodержanie kremniya v zernovykh kul'turah [Influence of silicon-containing nanopreparation on yield and silicon content in cereals] // *Dostizheniya nauki i tehniki APK*, 2011, no. 12, pp. 22–24.
- Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P. i dr. *Metody biohimicheskogo issledovaniya rastenii* [Methods of plants biochemical research] / Pod red. A.I. Ermakova. 3-e izd., pererab. i dop. Leningrad: Agropromizdat. Leningradskoe otdelenie, 1987. 430 p.
- Liutoev A.A., Smirnov Iu.G. Razrabotka tekhnologicheskoi skhemy ochistki stochnykh vod ot neftianykh zagriaznenii s ispol'zovaniem magnitnykh nanochastits [Development of a technological scheme for wastewater treatment from oil pollution using magnetic nanoparticles] // *Neftegazovoe delo: elektronnyi nauchnyi zhurnal*. 2013, no. 4, pp. 424–435. Elektronnyi resurs: <http://www.ogbus.ru>.
- Panova G.G., Semenov K.N., Shilova O.A., Korniyukhin D.L., Shpanev A.M., Anikina L.M., Khamova T.V., Artem'eva A.M., Kanash E.V., Charykov N.A., Udalova O.R., Galushko A.S., Zhuravleva A.S., Filippova P.S., Kudryavtsev D.V., Blokhina S.Yu. Vliyanie uglerodnykh i kremnezol'nykh nanomaterialov na ustoichivost' yarovogo yachmenya k zabolevaniyu kornevymi gnilyami [Influence of carbon and silica sol nanomaterials on spring barley resistance to root rot disease] // *Agrofizika*, 2018, no. 3, pp. 48–58.
- Rukovodstvo po metodam analiza kachestva i bezopasnosti pishevyykh produktov* [Guidance on methods for analyzing food quality and safety] / Ros. akad. med. nauk. In-t pitaniya / Pod red. professorov chl.-kor. MAI I.M. Skurikhina, akad. V.A. Tutel'yan. Moscow: Brandes, Medicina, 1998. 341 p.
- Tutel'yan V.A., Belyaev E.N. SanPiN 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.1078-01]. 2001.
- Chesnokov V.A., Bazyrina E.N., Bushueva T.M. *Vyrashivanie rastenii bez pochvy* [Growing plants without soil]. Leningrad: Publishing Leningrad State University, 1960. 170 p.
- Shilova O.A., Khamova T.V., Panova G.G., Anikina L.M., Artem'eva A.M., Kiryukhin D.L. Ispol'zovaniye zol' gel' tekhnologii dlya obrabotki semyan yachmenya // *Fizika i khimiya stekla*, 2018, v. 44, no. 1, pp. 39–47. DOI: 10.1134/S108765961801011X.
- Balk J., Schaedler T.A. Iron cofactor assembly in plants // *Ann. Rev. Plant Biol.*, 2014, no. 65, pp. 125–153.
- Hartmann H.T., Kester D.E., Davies F.T., Geneve R.L. *Plant propagation: Principles and Practices*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ, 6th edn. 1997.
- Hell R., Stephan U.W. Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants // *Planta*, 2003, no. 216, pp. 541–551.
- Huang S., Wang L., Liu L. et al. Nanotechnology in agriculture, livestock, and aquaculture in China. A review // *Agron. Sustain. Dev.*, 2015, no. 35, 369 p. (<https://doi.org/10.1007/s13593-014-0274-x>).
- ISTA, International Rules for Seed Testing. 2016. DOI: 10.15258/istarules.
- Janmohammadi M., Amanzadeh T., Sabaghnia N., Dashti S. Impact of foliar application of nano micronutrient fertilizers and titanium dioxide nanoparticles on the growth and yield components of barley under supplemental irrigation // *Acta Agriculturae, Slovenica*, 2017, v. 107, no. 2, pp. 265–276. DOI: 10.14720/aas.2016.107.2.01
- Kahrariyan B., Yeganehpour F., Beyginiya V., Samadiyan F. Effect of Fe foliar application on morphological and physiological traits of different dryland wheat cultivars // *Int. J. Adv. Biolog. Biomed. Res.*, 2013, no. 1(12), pp. 583–1589.
- Kuchma Elena A., Zolotukhin Peter V., Belanova Anna A., Soldatov Mikhail A., Lastovina Tatiana A., Kubrin Stanislav P., Nikolsky Anatoliy V., Mirmikova Lidia I., Soldatov Alexander V. Low toxic maghemite nanoparticles for theranostic applications // *International Journal of Nanomedicine*, 2017, no. 12, pp. 6365–6371.
- Mahmoudi M., Sant S., Wang B., Laurent S., Sen T. Superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPIONs): Development, surface modification and application in chemotherapy // *Advanced Drug Delivery Review*, 2011, v. 63, pp. 24–46.
- Marschner H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2th edn., London: Academic Press, 1995, 328 p.
- Morales-Diaz A.B., Ortega-Ortiz H., Juarez-Maldonado A., Cadenas-Pliego G., Gonzalez-Morales S., Benavides-Mendoza A. Application of nanoelements in plant nutrition and its impact in ecosystems // *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol*, 2017, no. 8, pp. 1–13.

- Nazari M., Ghasemi N., Maddah H. et al. Synthesis and characterization of maghemite nanopowders by chemical precipitation method // *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2014, no. 6, pp. 1–5.
- Palmqvist N.G.M., Seisenbaeva G.A., Svedlindh P., Kessler V.G. Maghemite nanoparticles acts as nanozymes, improving growth and abiotic stress tolerance in *Brassica napus* // *Nanosc. Res. Lett.*, 2017, no. 12, 631 p. DOI: 10.1186/s11671-017-2404-2.
- Tripathi D.K., Gaur S.S., Singh S., Pandey R., Singh V.P., Sharma N.C., Prasad S.M., Dube N.K., Chauhan D.K. An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity // *Plant Physiology. Biochem.*, 2017, v. 110, no. 2, pp. 2–12. DOI: 10.1007/s00709-018-1281-6.
- Voropaeva N., Karpachev V., Varlamov V., Figovsky O. Influence of efficient, multicomponent, polyfunctional, physiologically active (nano) chips with herbicide activity on rice crop growth, development, yield and on weed growth inhibition // *Int. Lett. Chem., Phys. Astron.*, 2014, no. 7, pp. 62–68.
- Vose P.B. Iron nutrition in plants: a world overview // *J. Plant Nutr.*, 1982, no. 5, pp. 233–249.
- Voropaeva N., Figovsky O., Ibraliu A. et al. Innovative nanotechnology for agriculture // *Scientific Israel – Technolog. Adv.*, 2012, no. 14 (1), pp. 98–105.
- Welch R.M., Graham R.D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective // *J. Experimen. Botany.*, 2004, no. 55, pp. 353–364.

УДК 633.16.321.631.526.32:631.529

DOI: 10.25695/AGRPH.2019.03.08

АДАПТИВНОСТЬ ПО МАССЕ 1000 ЗЕРЕН СОРТОВ ЯЧМЕНЯ СЕЛЕКЦИИ ОМСКОГО АГРАРНОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА

О. А. Юсова¹, П. Н. Николаев¹, Н. И. Аниськов², И. В. Сафонова²¹ФГБНУ Омский аграрный научный центр
644012, г. Омск, пр. Королева, 26;²Федеральный исследовательский центрВсероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44
E-mail: ksanajusva@rambler.ru*Поступила в редакцию 15 апреля 2019 г. принята к печати 28 августа 2019 г.*

Яровой ячмень является второй по значимости и распространению (после пшеницы) зерновой культурой в России. В Омской области допущено к использованию 9 сортов ячменя селекции Омского АНЦ. Одним из ведущих структурных элементов, определяющих продуктивность сорта, является масса 1000 зерен. Данный показатель наиболее полно отражает проявление адаптивных свойств сортов, поскольку является совокупным признаком, который характеризует конечный результат взаимодействия «генотип × среда». Целью исследования являлась характеристика адаптивности сортов ярового ячменя по признаку «масса 1000 зерен» в условиях Омского Прииртышья. Объектами исследования послужили 11 высокопродуктивных сортов ярового ячменя селекции ФГБНУ Омский АНЦ, рекомендованные для возделывания в данном регионе и устойчивые к засухе, полеганию, головневому заболеванию. В рамках исследования определены коэффициент адаптивности (по Л. А. Животкову), индекс условий среды, коэффициент экологической пластичности и нелинейные отклонения от линии регрессии (по S. A. Eberhart, W. A. Russell), коэффициент мультипликативности (по В. А. Драгавцеву), устойчивость к стрессу и компенсаторная способность (по А. А. Rossielle, J. Hemblin в изложении А. А. Гончаренко). Расчет коэффициента адаптивности сортов по нескольким методикам предполагает использование принципа ранжирования и проведение итоговой оценки по сумме рангов каждого сорта с учетом того, что первый ранг является более высоким. Согласно результатам проведенных исследований, максимальной устойчивостью к варьирующимся условиям возделывания характеризуются сорта ярового ячменя Подарок Сибири, Саша, Сибирский Авангард, Омский 91, Омский 96, Омский 100 и Омский 90 (сумма рангов = 21,0÷33,0).

Ключевые слова: яровой ячмень, масса 1000 зерен, стабильность, пластичность, стрессоустойчивость, адаптивность, ранг, коэффициент регрессии, коэффициент мультипликативности.