

Исследование наноразмерного порошка оксида железа в качестве биологически активного материала

**В. С. Катаев, М. А. Федотов, Н. А. Андреева, А. А. Фомина,
В. А. Волченкова, А. А. Алпатов**

Получен полидисперсный нанопорошок оксида железа, состоящий из гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и магнетита Fe_3O_4 , методом твердофазного восстановления гидроксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$. На основе полученного нанопорошка оксида железа готовили водные суспензии в диапазоне концентраций 0,25 – 1,25 мг/л с дисперсностью частиц 100 – 400 нм. Для оценки биологической активности нанопорошка оксида железа проводили предпосевную обработку семян кукурузы *Zéa máys*. Исследовано влияние нанопорошка на всхожесть, энергию прорастания семян и длину корней растения. Установлено, что обработка наночастицами оказывает стимулирующее воздействие на развитие организма растения, позволяя добиться увеличения всхожести на 15 % и корневой массы на 23 %. Определение количественного содержания железа в разных частях растения проводили методом атомно-эмиссионной и атомно-адсорбционной спектроскопии. Показано, что в результате обработки растения наночастицами железа наблюдается накопление железа в корневой массе с последующим перераспределением в листья для стимуляции протекания процесса фотосинтеза.

Ключевые слова: наночастицы, оксид железа, твердофазное восстановление, биологическая активность, атомно-эмиссионная спектроскопия, атомно-адсорбционная спектроскопия.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-4-42-49

Введение

С развитием нанотехнологий важной задачей стала принципиальная возможность получения и использования наноматериалов в практических целях. Наибольший интерес представляют наночастицы, которые из-за своих физико-химических особенностей могут использоваться в различных областях промышленности, медицины и в сельскохозяйственном производстве.

Перспективность наночастиц в сельском хозяйстве состоит в возможности их использования в качестве биодобавок, которые обладают целым рядом положительных свойств: повышением урожайности сельскохозяйственных культур и качества получаемой продукции, экономической эффективностью, экологической безопасностью.

Основной интерес для исследований на данный момент представляют наночастицы Fe и его оксидов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 [1 – 5].

Ключевая роль железа заключается в участии образования фотосинтетического зелёного пигмента — хлорофилла, который является неотъемлемой составляющей протекания химического процесса преобразования энергии видимого света в энергию химических связей органических веществ — фотосинтеза. Для образования хлорофилла в растении необходимо иметь оптимальные условия для минерального питания растения. Прежде всего, достаточное содержание железа, которое является активным катализатором образования хлорофилла. В случае недостаточного содержания элемента растение теряет зелёный окрас, что является проявлением хлороза [6 – 9].

Таким образом, использование получаемых наночастицы оксидов железа в виде биологически активной добавки может являться основой для получения препаратов, позволяющих добиться увеличения эффективности сельскохозяйственного производства.

Эффективность использования наночастиц была показана в работе [10]. Из результатов исследования следует, что наночастицы Fe_3O_4 оказывают существенное влияние на накопление питательных микроэлементов P, K, Ca, Mn в корнях, стеблях и листьях фасоли. Обработка наночастицами Fe_3O_4 побегов *Zea mays* в работе [11] стимулировала процесс фотосинтеза, приводила к снижению скорости перекисного окисления липидов мембран, ускоряла вегетативный рост и способствовала более раннему переходу в генеративную фазу растения.

Цель данной работы — исследование нанопорошков оксида железа, их биологической активности в качестве микроэлемента и изучение особенностей его накопления и распределения в различных частях побега *Zea mays*.

Материалы и методы

Порошки оксидов железа получали методом твердофазного восстановления гидроксида железа активированным углем в инертной атмосфере [12]. Получение исходного сырья — гидроксида железа — осуществляли путем осаждения при смешивании водного раствора аммиака и раствора хлорида железа (III) с последующей промывкой, фильтрацией осадка и сушкой при температуре 120 °С. Высушенный гидроксид железа смешивали с активированным углем, а затем нагревали до температуры 700 °С в среде аргона в электропечи.

Морфологию частиц исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием растрового электронного микроскопа с полевым катодом “Quanta 650 FEG” (Thermo Fisher Scientific, США).

Для исследования биологически активных свойств полученных порошков оксидов железа проводили предпосевную обработку семян на примере кукурузы. Семена кукурузы обрабатывали коллоидными растворами оксидов железа в диапазоне концентраций 0,25 – 1,25 мг/л. Для приготовления растворов навески порошка оксидов железа помещали в воду и воздействовали ультразвуком частотой 35 кГц в ультразвуковой ванне УЗВ-1,3 (Сапфир, Россия) мощностью 200 Вт в течение 10 мин. Полученную суспензию разводили водой до получения соот-

ветствующей концентрации раствора. Семена замачивали в приготовленном растворе в течение 20 мин.

Распределение частиц железа в коллоидных растворах определяли методом динамического светорассеяния с помощью прибора “Zetasizer Nano ZS” (Malvern Panalytical, Великобритания).

Проращивание семян осуществляли в два этапа. На первом этапе семена выращивали в лабораторных условиях для исследования всхожести и развития растений на ранних стадиях прорастания. Далее семена пересаживали в грунт и выращивали в полевых условиях для исследования влияния предпосевной обработки на прорастание семян и накопление железа в различных частях растений на стадии созревания.

Семена для лабораторных исследований помещали в чашки Петри на влажные фильтры. Были подготовлены образцы с концентрацией железа: 1 — 0,25 мг/л; 2 — 0,75 мг/л; 3 — 1,25 мг/л. Полив осуществляли небольшим количеством воды один раз в день. Наблюдения проводили в течение 40 суток.

Растения кукурузы на стадии созревания извлекали из почвы для дальнейшего исследования. После извлечения из почвы растения отмывали от крупных фрагментов почвы и высушивали при комнатной температуре. Высушенные образцы растений разделяли на 5 составляющих каждый: корни, стебель, листья, зерна, соцветия.

Каждую составляющую промывали последовательно несколько раз дистиллированной и бидистиллированной водой до полного удаления загрязнений почвы и пыли.

Промытые образцы высушивали на фильтровальной бумаге в течение 4 суток при комнатной температуре. Высушенные образцы измельчали до размеров частиц не более 2 мм. Для предотвращения попадания железа в состав образцов при измельчении использовали керамические ножи и фарфоровые ступки.

Элементный анализ образцов проводили методами атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) на последовательном атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой фирмы “HORIBA JOBIN YVON”, модель “ULTIMA 2” (Франция-Япония) и пламенным вариантом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на спектрометре фирмы Thermo Fisher Scientific (США), модель iCE 3000.

Все используемые реактивы были квалификации ОСЧ. В работе использовали дважды перегнан-

ную воду. Стандартные растворы железа готовили из металла высокой степени чистоты (99,99 %) и из фиксаля фирмы “Merk”.

Для хранения растворов применяли одноразовую посуду из полиэтилена и полипропилена — пробирки объемом 50 мл. Перед использованием пробирки вымачивали 5 дней в 5 %-й HNO_3 , а затем промывали дважды перегнанной водой.

Растворение образцов проводили с применением системы микроволновой пробоподготовки закрытого типа MARS 5 (производство SEM Corporation, США) и микроволновой системы “Минотавр-2” (фирма ЛЮМЕКС, Россия, Санкт-Петербург). Приборы предназначены для растворения различных материалов в лабораторных условиях.

Результаты и обсуждение

Восстановленный порошок оксида железа имел следующий фазовый состав: 89,4 масс. % магнетита Fe_3O_4 и 2,9 масс. % гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Содержание углерода составляло 7,7 масс. %.

Микроструктура восстановленного порошка оксида железа приведена на рис. 1.

Полученные порошки оксида железа являются полидисперсными и могут образовывать агломераты, состоящие из агрегированных наноразмерных частиц. Размеры агломератов составляют от 1 до 6 мкм.

Результаты распределения частиц в суспензии на основе $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4 представлены на рис. 2.

Всего было проведено пять измерений размеров частиц. Диапазон распределения размеров частиц составляет от 100 до 400 нм.

На основе лабораторных результатов наблюдений было выявлено, что обработка семян способствовала более интенсивному росту растений по сравнению с контролем. Обработанные ростки имели более развитую корневую систему уже на ранних стадиях прорастания (6 сутки). На 13 сутки у большей части обработанных растений появилась вторичная корневая система. Образцы, обработанные раствором оксидов железа, также имели более мощные стебли по сравнению с контрольным образцом (13 сутки), а также большую кустистость. Образцы 1 – 3 мало различались между собой на ранних этапах созревания. По высоте стеблей на 13 сутки самым лучшим являлся образец 2.

Результаты всхожести образцов 1 – 3, выращенных в полевых условиях, составили 75,3 %, 69,4 %, 77,1 % соответственно. Контрольные образцы показали всхожесть 58,9 %. Опытные образцы растений имели более развитую корневую систему по сравнению с контролем, которая способствует сокращению вегетационного периода растений за счет интенсификации процессов обмена веществ и быстрого роста органов растений и, как следствие, увеличению урожайности сельскохозяйственных культур. Средняя длина корней образцов 1 – 3 составляла 15,8 см, 13,8 см и 14,7 см соответственно, а средняя длина корней контрольных растений — 12,9 см. В результате обработки суспензиями на основе наночастиц оксидов железа ростков кукурузы

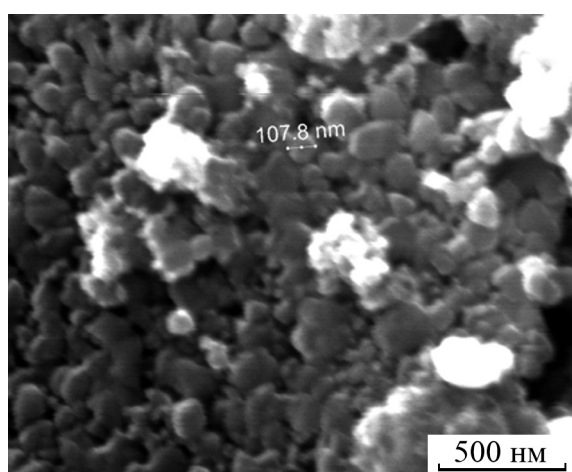


Рис. 1. РЭМ изображение структура порошка оксида железа.

Fig. 1. SEM image of the structure of iron oxide powder.

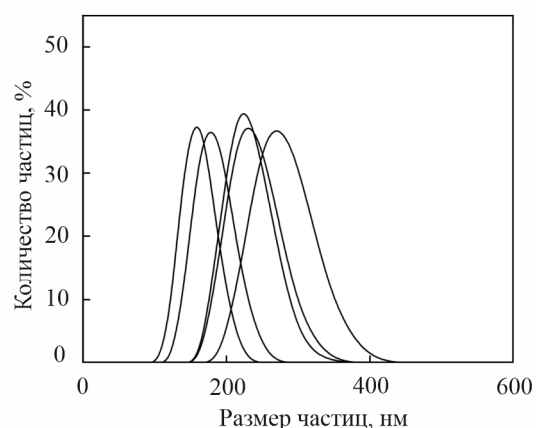


Рис. 2. Распределение по размерам частиц порошка оксида железа в суспензии.

Fig. 2. Particle size distribution of iron oxide powder in suspension

удалось добиться увеличения корневой массы от 7 до 23 %.

Для количественного определения содержания железа в различных частях кукурузы использовали разрушающие методы анализа АЭС-ИСП и ААС. Исследуемый материал был переведён в раствор. Главные требования химической пробоподготовки: обеспечение полноты перевода элементов в раствор, стабильность растворов во времени, получение низких значений холостого опыта. Предложены схемы переведения проб в раствор с разнообразными смесями кислот, как с применением открытых сосудов, так и закрытых автоклавных систем: микроволновая печь MARS 5, микроволновая система “Минотавр-2” при различных режимах (P , T):

- сухое озоление при температуре 600 °С;
- мокрое озоление различными смесями кислот; автоклавное растворение.

Сухое озоление оказалось ненадёжным способом, так как приводит к значительным потерям определяемого элемента.

Опробована классическая схема переведения проб в раствор (“мокрое озоление”) в открытых системах. Растворение растений проводили смесью концентрированных серной и азотной кислот. Полноты растворения добивались нагреванием образцов в высоких термостойких стаканах с серной кислотой до появления густых белых паров серной кислоты с последующим внесением азотной кислоты. При этом образуется нитрозилсерная кислота, являющаяся сильным окислителем и позволяющая перевести в раствор любые ткани и органы живых организмов. Внесение азотной кислоты продолжали до получения прозрачных растворов. После этого растворы упаривали до полного удаления из раствора HF и H₂SO₄ (до полного прекращения выделения из растворов густых паров серной кислоты). К полученным сиропообразным растворам добавляли 4 мл царской водки (смеси концентрированных азотной и соляной кислот в соотношении 1:3), растворы подогревали, переводили в мерные колбы и бидистиллированной водой доводили объём растворов до 25 мл. В полученных растворах определяли содержания железа, используя методы ААС или АЭС-ИСП.

Наиболее оптимальным методом переведения проб в раствор оказалось кислотное разложение в автоклавах. В настоящее время в практике аналитических лабораторий широко используют установки для разложения под давлением с традиционными источниками нагрева и в микроволновых печах.

Измельченные образцы зерен кукурузы массой 50 – 100 мг взвешивали на лабораторных весах и

загружали в подготовленные лайнеры. К навескам добавляли по 5 мл 70 % азотной кислоты и разлагали в автоклаве MARS 5 при температуре 200 °С и давлении 1215 кПа в течение 15 мин. Вскрытые пробы переводили бидистиллированной водой в мерные колбы емкостью 25 мл. В полученных растворах определяли содержание железа, используя методы ААС или АЭС-ИСП.

По сравнению с модулем MARS 5 СВЧ-минерализатор “Минотавр-2” имеет существенные ограничения: количество одновременно разлагаемых проб составляет 1, более мягкие режимы разложения и использование только азотной кислоты. Поэтому прибор применяли очень ограниченно для единичных проб с простой минерализацией.

Были найдены оптимальные аналитические параметры для определения железа методами АЭС-ИСП и ААС (табл. 1).

Изучено влияние матрицы на аналитические сигналы определяемого элемента. Пределы об-

Таблица 1

Характеристики аналитических линий железа при определении методами АЭС-ИСП и ААС

Table 1

Characteristics of analytical lines of iron in the determination by ICP-AES and AAS methods

Параметры	Метод анализа	
	АЭС-ИСП	ААС пламя: воздух-C ₂ H ₂
Длина волны, λ , нм	259,940	248,3
Предел обнаружения, ppb (3σ)		
10% HNO ₃	1,1	1,3
На минеральном фоне растений	2,9	2,1
Линейность графика определения железа, мкг/мл	0 – 300	0 – 7
Оптимальный диапазон определения железа, мкг/мл	0,01 – 20	0,05 – 5
Относительное стандартное отклонение S_r	0,005	0,006
Диапазон определяемых концентраций, масс. %	0,0005 – 10	0,0003 – 5
Относительное стандартное отклонение S_r	0,15 – 0,005	0,14 – 0,006

наружения железа на фоне 200 ppm матрицы значительно отличаются от пределов обнаружения в чистых растворах (0 ppm матрицы) (табл. 1). С использованием модельных растворов выявлены потенциальные спектральные влияния, а также учтены влияния не спектрального характера.

На точность определения низких концентраций аналита методами ААС и АЭС-ИСП значительное влияние оказывает матрица. Для устранения матричных влияний и уменьшения погрешности определения низких содержаний железа (< 0,05 %) градуировочные растворы готовили одинаковыми по составу и содержанию кислот с растворами анализируемых образцов.

Для достижения большей точности анализа определение железа проводили на прямолинейных участках градуировочных графиков в области постоянства и минимума относительного стандартного отклонения ($S_r \leq 0,005$) результатов определения в интервале концентраций 0,1 – 20 ppm Fe.

Результаты определения содержаний железа в семенах кукурузы и её разных частях, выполненные методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индукционно-связанной плазмой и атомно-абсор-

бционной спектрометрии, представлены в табл. 2. Из-за отсутствия твердых стандартных образцов для подтверждения правильности полученных результатов определения элемента проводили сравнение данных методов АЭС-ИСП и ААС. Хорошая сходимость результатов определения железа разными методами подтверждает правильность определения элемента.

Содержание железа в зернах и листьях повышалось с увеличением концентрации обрабатываемого раствора и превышало значения для контрольных образцов в 1,2 – 2,6 раза для зерна и в 1,1 – 1,6 раза для листьев (табл. 2). Было установлено, что содержание железа в листьях повышается с увеличением концентрации используемой суспензии на основе оксидов железа. Из результатов ААС и АЭС следует, что количество микроэлемента в корневой системе кукурузы уменьшается с ростом концентрации железа в используемом растворе. Количество железа в стеблях обработанных растений практически не зависит от концентрации раствора, при этом превышает значения для контрольных образцов в 1,4 раза.

Распределение железа по различным частям кукурузы обусловлено стремлением растительного организма обеспечить более эффективное протекание процесса фотосинтеза в растениях [13]. Первичная аккумуляция железа происходит в корнях растения с дальнейшим перераспределением из корневой системы кукурузы в стебли и листья для стимуляции процесса образования хлорофилла, синтеза белков и обмена питательных веществ. Обеспечение оптимального содержания микроэлемента и поддержание функционирования основных функций жизнедеятельности кукурузы позволит повысить урожайность и всхожесть сельскохозяйственной культуры.

Суспензии на основе оксидов железа можно применять в качестве биоактивной добавки, оказывающей благоприятное воздействие на организм растения.

Выводы

Установлено, что смесь магнитных оксидов железа обладает биологически активными свойствами. На основе полученных полидисперсных оксидов железа созданы опытные образцы препаратов для исследования. Установлено, что порошки оксидов железа могут использоваться взамен нанодисперсного железа.

Использование АЭС-ИСП и ААС с взаимодополняющими аналитическими возможностями в

Таблица 2

Результаты определения железа в разных частях растений, полученные различными методами ($n = 10; p = 0,95$)

Table 2

Results of iron determination in different parts of plants obtained by different methods ($n = 10; p = 0,95$)

Образцы		Количественное содержание железа, мг/кг	
		АЭС с ИСП	ААС (пламенный вариант)
Зерно	Контроль	26,6 ± 2,8	25,6 ± 2,7
	1	32,8 ± 4,1	33,6 ± 4,0
	2	48,4 ± 5,2	49,1 ± 5,3
	3	70,0 ± 6,5	68,5 ± 6,5
Стебель	Контроль	32,8 ± 3,0	33,9 ± 3,1
	1	48,2 ± 5,2	45,4 ± 5,2
	2	47,1 ± 2,7	44,2 ± 2,8
	3	46,0 ± 5,1	43,9 ± 5,0
Листья	Контроль	219 ± 15	222 ± 14
	1	253 ± 16	241 ± 15
	2	243 ± 16	240 ± 15
	3	351 ± 18	355 ± 20
Корни	Контроль	1580 ± 45	1540 ± 40
	1	1470 ± 42	1490 ± 38
	2	1320 ± 41	1315 ± 41
	3	1010 ± 40	1030 ± 35

сочетании с оптимизированными способами пробоподготовки как в открытых системах, так и в автоклавах с микроволновым воздействием, обеспечило проведение контроля содержания Fe в широком диапазоне концентраций от 0,0005 до 10 % с улучшенными метрологическими характеристиками в растениях без предварительного отделения матрицы и без использования твердых стандартных образцов состава.

Применение автоклавной методики пробоподготовки позволило снизить пределы обнаружения аналита, повысить точность анализа и установить зависимость количественного содержания железа в различных органах растений в конце вегетационного периода от концентрации активного вещества в растворе при предпосевной обработке семян растения.

Использование биологически активных опытных образцов препаратов при предпосевной обработке семян растений кукурузы позволило повысить всхожесть и увеличить энергию прорастания семян.

Работа была выполнена в рамках государственного задания № 075-01176-23-00.

Литература/References

1. Kreslavskii V.D., Ivanov A., Khudyakova A.Y., Shmarev A., Kosobryukhov A.A. Influence of iron nanoparticles Fe₃O₄ and Fe₂O₃ on the growth, photosynthesis and antioxidant balance of wheat plants (*Triticum aestivum*). *BIO Web of Conferences*, 2022, v. 42, art. 10123, 7 p. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224201023>.
2. Li M., Zhang P., Adeel M., Guo Z., Chetwynd A.J., Ma C., Bai T., Hao Y., Rui Y. Physiological impacts of zero valent iron, Fe₃O₄ and Fe₂O₃ nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers. *Environmental Pollution*, 2021, v. 269, art. no. 116134.
3. Konate A., Wang Y., He X., Adeel M., Zhang P., Ma Y., Ding Y., Zhang J., Yang J., Kizito S., Rui Y., Zhang Z. Comparative effects of nano and bulk-Fe₃O₄ on the growth of cucumber (*Cucumis sativus*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, v. 165, pp. 547 – 554, doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.053.
4. Rui M., Ma C., Hao Y., Guo J., Rui Y., Tang X., Zhao Q., Fan X., Zhang Z., Hou T., Zhu S. Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*). *Frontiers in Plant Science*, 2016, v. 7, no. 815, 10 p.
5. Zia-ur-Rehman M., Naeem A., Khalid H., Rizwan M., Ali S., Azhar M. Responses of plants to iron oxide nanoparticles. *nanomaterials in plants, Algae and Microorganisms*, 2018, pp. 221 – 238.
6. Rout G.R., Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*. 2019, v. 3, pp. 1 – 24.
7. Saeedi S., Mousavi M., Mogharab M. In-vitro analysis of the efficacy of Fe oxide nanoparticles in prevention of iron deficiency chlorosis in citrus rootstock (*Citrus volkameriana*). *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2016, v. 4, pp. 484 – 492.
8. Cieshi M.T., Polyakov A.Y., Lebedev V.A., Volkov D.S., Pankratov D.A., Veligzhanin A.A., Perminova I.V., Lucena J.J., Eco-Friendly Iron-humic nanofertilizers synthesis for the prevention of iron chlorosis in soybean (*glycine max*) grown in calcareous soil. *Frontiers in Plant Science*. 2019, v. 10, no. 413, 17 p.
9. Predoi D., Ghita R.V., Iconaru S.L., Cimpeanu C.L., Raita S.M. Application of nanotechnology solutions in plants fertilization. *Urban Horticulture — Necessity of the Future* (eds. Shekhar Solaney S., Akhar S., Isabel Luna Maldonado A., et al.). 2020, pp. 1 – 24.
10. De Souza A., Govea-Alcaide E., Masunaga S.H. et al. Impact of Fe₃O₄ nanoparticle on nutrient accumulation in common bean plants grown in soil. *SN Applied Sciences*. 2019, v. 1, no. 308, 8 p.
11. Mahboobeh J.L., Ghanati F., Modarres-Sanavi A.M., Effect of Fe₃O₄ nanoparticles and iron chelate on the antioxidant capacity and nutritional value of soil-cultivated maize (*Zea mays*) plants. *Crop and Pasture Science*. 2016, v. 67, no. 6, pp. 621 – 628.
12. Fedotov M.A., Kovalenko L.V., Folmanis G.E., Samus M.A., Krasitskaya S.G., Tananaev I.G. Functional materials for radioactive waste management. *Nanotechnologies in Russia*. 2018, v. 13, no. 11 – 12, pp. 578 – 584.
13. Baker A.J.M. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*. 1981, v. 3, pp. 643 – 654.

*Статья поступила в редакцию — 27.07.2022 г.
после доработки — 15.12.2022 г.
принята к публикации — 06.12.2022 г.*

Катаев Владислав Станиславович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), инженер-исследователь, специалист в области получения наноразмерных материалов. E-mail: Kat.Vld22@gmail.com.

Федотов Михаил Александрович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области порошковой металлургии. E-mail: mikle_fed@mail.ru.

Андреева Надежда Александровна — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), научный сотрудник, специалист в области атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и пробоподготовки. E-mail: andreeva150388@mail.ru.

Волченкова Валентина Анатольевна — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области аналитической химии, в том числе атомно-адсорбционного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. E-mail: volch.v.a@mail.ru.

Фомина Алла Алексеевна — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), научный сотрудник, специалист в области пробоподготовки образцов для спектрометрического анализа. E-mail: fomina2402@mail.ru.

Алпатов Андрей Алексеевич — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН (Москва, 119334, Ленинский проспект, 49), доктор экономических наук, заведующий лабораторией, специалист в области наноматериалов. E-mail: aaalpatov@imet.ac.ru.

Research of nanosized iron oxide powder as a biologically active material

V. S. Kataev, M. A. Fedotov, N. A. Andreeva, A. A. Fomina,
V. A. Volchenkova, A. A. Alpatov

A polydisperse nanopowder of iron oxide, consisting of hematite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and magnetite Fe_3O_4 , was obtained by the method of solid-phase reduction of iron hydroxide $\text{Fe}(\text{OH})_3$. On the basis of the obtained iron oxide nanopowder, aqueous suspensions were prepared in the concentration range of 0.25 – 1.25 mg/l with a particle dispersion of 100 – 400 nm. To assess the biological activity of iron oxide nanopowder, pre-sowing treatment of corn seeds *Zéa máys* was carried out. It has been established that the treatment with nanoparticles has a stimulating effect on the development of the plant organism, making it possible to achieve an increase in germination by 15% and root mass by 23%. Determination of the quantitative content of iron in different parts of the plant was carried out using atomic emission and atomic absorption spectroscopy. It was shown that as a result of treatment of plants with iron nanoparticles, its accumulation in the root mass with subsequent redistribution to the leaves to stimulate the process of photosynthesis is observed.

Key words: nanoparticles iron oxide, solid-phase reduction, biological activity, atomic emission spectroscopy, atomic absorption spectroscopy.

Kataev Vladislav — Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky prospekt 49), postgraduate student, junior research assistant, specialist in the field of obtaining nanoscale materials E-mail: Kat.Vld22@gmail.com.

Fedotov Mikhail — Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky Prospekt, 49), PhD (Eng), senior researcher; specialist in the field of powder metallurgy. E-mail: mikle_fed@mail.ru.

Andreeva Nadezhda — Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (Moscow, 119334, Leninsky prospect, 49), researcher; specialist in the field of inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy and sample preparation. E-mail: andreeva150388@mail.ru.

Volchenkova Valentina — Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (Moscow, 119334, Leninsky Prospekt, 49), PhD (Chem), leading researcher; specialist in the field of analytical chemistry, including atomic absorption analysis and atomic emission spectroscopy with inductively coupled plasma E-mail: volch.v.a@mail.ru.

Fomina Alla — Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS (Moscow, 119334, Leninsky prospect, 49), researcher; specialist in the field of sample preparation for spectrometric analysis. E-mail: fomina2402@mail.ru.

Alpatov Andrey — Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of (Moscow, 119334, Leninsky Prospekt, 49), Dr Sci (Econom), head of laboratory; specialist in the field of nanomaterials. E-mail: aalpatov@imet.ac.ru.