

## МОРФОБИОЛОГИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕНОТИПОВ *Pinus sylvestris* НА ДЕЙСТВИЕ НАНОЧАСТИЦ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ

© 2021 г. Р. Г. Калякина<sup>1,\*</sup>, З. Н. Рябинина<sup>2</sup>, М. В. Рябухина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

<sup>2</sup> Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, Оренбург, Россия

\*E-mail: kalyakina\_railya@mail.ru

Поступила в редакцию 30.06.2020 г.

После доработки 16.09.2020 г.

Принята к публикации 21.09.2020 г.

Представлены результаты изучения влияния наночастиц Cu и Fe на развитие семян сосны обыкновенной двух генотипически различающихся популяций, произрастающих в разных геоботанических, почвенно-геологических условиях на территории Оренбургской области. Установлено, что морфобиологическая реакция семян на действие наночастиц Cu и Fe вне зависимости от происхождения семенного материала однонаправлена и у семян, полученных от сосен, адаптированных к повышенному естественному геохимическому фону по Cu и Fe (популяция Кваркенского района), и у семян, полученных из семян, собранных от сосен, произрастающих в условиях более низкого геохимического фона (популяция Бузулукского района). Присутствие наночастиц Cu оказало токсическое воздействие на рост семян сосны, Fe – стимулирующее. Однако морфометрические показатели семян, полученных из семян, собранных в популяции Кваркенского района, достоверно отличались от семян Бузулукского района. При наличии в среде наночастиц Cu первая группа семян превосходила вторую по длине главного корня на 2.1–4.9%, по количеству придаточных корней – до 10.2%, длине придаточных корней – на 0.84–7.61%. В присутствии наночастиц Fe в среде первая группа семян также превосходила вторую по длине главного корня на 0.39–2.23%, по количеству придаточных корней – до 3.1%, длине придаточных корней – на 0.55–1.04%.

DOI: 10.1134/S1992722321010052

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективное функционирование природных экосистем определяется их разнообразием на биосферном, популяционном и видовом уровнях [1]. В настоящее время одними из приоритетных задач являются изучение и практическое использование адаптивной изменчивости и популяционной структуры видов в природоохранной и хозяйственной деятельности человека. В связи с этим большой интерес представляют виды, имеющие значительный географический ареал, широкую экологическую амплитуду условий произрастания, значительную хозяйственную ценность для человека. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), распространенная на большей части территории России, имеет приоритетное значение в природоохранной и хозяйственной деятельности человека [2]. В условиях Оренбургской области проходит южная граница вида, в связи с контрастными геоботаническими, почвенно-геологическими районами произрастания данного вида становится актуальным изучить адаптивные реакции различных популяций одного вида к действию наночастиц, в частности Fe и Cu [3–10].

Особую популярность в сельском и лесном хозяйстве получили препараты на основе нанометаллов Fe и Cu. Медь используют для протравливания семян и стимуляции роста растений [11–15]. Однако медь в избытке оказывает токсическое действие, при этом корневой барьер играет заметную роль в формировании толерантности к избытку данного металла [16, 17]. Предпосевная обработка семян нанопорошком Cu оказывает положительное влияние на всходы травянистых растений, данные о влиянии наночастиц Cu на древесные растения единичны. Влияние нанопорошков на рост и развитие древесных растений изучено не на всех стадиях онтогенетического развития в связи с продолжительным периодом развития (сто и более лет) и невозможностью постановки эксперимента в условиях *in vitro*.

Гипотеза исследования основывается на том, что в условиях сложной структурной организации природных ландшафтов Оренбургской области *P. sylvestris* характеризуется высоким разнообразием генетических признаков, которые сформировались в конкретных зонально-климатических, эдафических и ценологических условиях, что под-

тверждается данными [18]. Совокупность и разнообразие факторов среды определили высокое генетическое разнообразие внутри исследуемых популяций *P. sylvestris*. При этом наблюдается значительный для данного вида набор адаптивных вариаций, которые проявляются морфобиологически и могут влиять на выраженность реакции этих растений на действие наночастиц тяжелых металлов, в частности Fe и Cu [1, 4, 7].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования являлись сеянцы *P. sylvestris*, полученные из семян, собранных с модельных деревьев на контрольных участках Кваркенского (группа А) и Бузулукского (группа Б) районов Оренбургской области и прошедших предварительную стратификацию [19]. Модельные площади закладывали в пределах естественных массивов *P. sylvestris*. Площади исследования выбрали с учетом полярности условий районов произрастания реликтовых сосен.

Согласно физико-географическому районированию [20] площади исследования находятся в пределах двух физико-географических стран – Восточно-Европейской равнины, которая представлена Бузулукским бором, и Тургайской равнинной страны, которая представлена островными борами: Аландский, Болотовский и Адрианопольский.

Районы исследования различались почвенными условиями. Бузулукский бор расположен в пределах Самаро-Малокиньельском сырцово-плакорно-увалистого района Заволжско-Общесыртской северной-степной возвышенной провинции. В соответствии с широтно-климатическим зонированием территория входит в подзону северной степи (гидротермический коэффициент составляет 0.7). Основу почвенного покрова составляют черноземы обыкновенные с разнотравно-ковыльной степью. Песчаные бугристые террасы реки Боровки, заполнившие обширную котловину Бузулукского бора, представлены дерново-боровыми псевдо-оподзоленными песчаными почвами (псаммоземами) [21].

Аландский, Болотовский и Адрианопольский боры расположены на территории Урало-Суундукского плакорно-останцово-увалистого района Урало-Тобольской высокоравнинной степной провинции. Основные боры расположены на наибольших ровных площадках и понижениях, для которых характерны темно-серые лесные почвы на продуктах выветривания гранитоидов и пестроцветных глин древних кор выветривания, выстилающих понижения в рельефе [21].

Насаждения характеризовались высоким генетическим разнообразием и, по данным кластерного анализа (UPGMA), основанного на степени

сходства популяций по ISSR-маркерным признакам, принадлежали к разным генетическим группам. Результаты исследования подтверждаются анализом главных компонент в программном комплексе “R” [18].

Культивирование сеянцев *P. sylvestris* проводили с использованием наночастиц Cu ( $103 \pm 2$  нм) покрытые тонкой оксидной пленкой CuO) и наночастиц Fe ( $80 \pm 15$  нм) [22]. Наночастицы были получены в институте энергетических проблем химической физики РАН (Москва) на установке МиГен при помощи метода высокотемпературной конденсации.

На первом этапе исследования навески исследуемых веществ (100 ммоль/л каждого вещества) разводили дистиллированной водой (10 мл) и диспергировали путем обработки ультразвуком частотой 35 кГц в источнике ванного типа “Сапфир ТТЦ” 30 мин, после чего готовили четырехкратные разведения.

В качестве субстрата для проращивания использовали кварцевый песок, предварительно обработанный. Биотестирование проводили в соответствии с ГОСТ 15150 в лабораторных условиях [23]. Эксперимент проводили по следующей схеме: в контейнеры помещали предварительно подготовленный субстрат, семена *P. sylvestris* заглубляли и проводили орошение заранее приготовленными суспензиями или растворами. Орошение контрольных образцов проводили дистиллированной водой. После чего контейнеры помещали в термостат с оптимальным режимом проращивания на срок 14 дней, при необходимости проводили увлажнение субстрата исследуемыми растворами. Диагностическими признаками служили всхожесть семян, морфометрические показатели сеянцев и концентрация Cu и Fe в их осевых органах [24].

Измерения массовой концентрации химических элементов проводили с использованием рентгенофлуоресцентного анализа (спектрометр универсальный рентгенофлуоресцентный СУР-02 “РЕНОМ ФВ” (Россия)).

Статистическую обработку результатов выполняли в программе Microsoft Excel 2007. Из каждой выборки исключали значения параметров, выходящие за рамки  $\pm 3\sigma$ . Итоговые значения, представленные в табл. 1 и 2, являются средней арифметической величиной  $\pm$  основная ошибка средней арифметической величины. Оценку существенности различий средних величин проводили с использованием *t*-критерия Стьюдента.

Анализ роста сеянцев *P. sylvestris* в среде с модельным содержанием наночастиц Cu и Fe выявил значимые изменения морфометрических признаков по сравнению с контролем. Присутствующие в среде наночастицы Cu изменяли

**Таблица 1.** Морфометрические показатели сеянцев *Pinus sylvestris* L. при культивировании в среде, содержащей наночастицы Си

Группа	Длина главного корня, мм	Количество придаточных корней, шт.	Длина придаточных корней, мм	Высота стволика, мм	Диаметр корневой шейки, мм
Контроль					
А	97.7 ± 4.92*	2.09 ± 0.05*	75.4 ± 3.8*	34.2 ± 1.2	1.2 ± 0.02
Б	97.9 ± 4.94	2.09 ± 0.06	75.8 ± 3.7	34.5 ± 1.1	1.2 ± 0.02
100 ммоль/л					
А	3.1 ± 0.52*	3.5 ± 0.28*	1.97 ± 0.16		
Б	3.0 ± 0.46	3.7 ± 0.27	2.12 ± 0.17*		
25 ммоль/л					
А	4.1±1.5	3.7±0.3	2.24 ± 0.25		
Б	3.9±1.4	4.0±0.3	2.37 ± 0.23		
6.25 ммоль/л					
А	16.0 ± 1.94*	3.9 ± 0.22*	6.18 ± 0.51	8.9 ± 0.05	0.6 ± 0.01
Б	15.5 ± 1.84	4.3 ± 0.23	6.31 ± 0.52*	8.7 ± 0.05	0.6 ± 0.01
1.56 ммоль/л					
А	44.9 ± 3.82*	2.66 ± 0.18	23.04 ± 1.63	24.9 ± 1.3	0.9 ± 0.01
Б	42.73 ± 1.77	2.69 ± 0.18	23.61 ± 1.62*	24.7 ± 1.4	0.8 ± 0.02
0.39 ммоль/л					
А	94.6 ± 8.08	2.18 ± 0.15*	66.65 ± 4.53	30.5 ± 1.2	1.1 ± 0.02
Б	92.6 ± 7.89	2.34 ± 0.14	67.21 ± 4.59	30.1 ± 1.2	1.1 ± 0.01

\*  $p < 0.05$ .

всхожесть семян при максимальной концентрации (100 ммоль/л).

Наночастицы Си оказывали токсическое воздействие на рост сеянцев *P. sylvestris*. При концентрациях 100 и 25 ммоль/л образования надземного побега не происходило. Достоверно отмечена большая устойчивость сеянцев группы А. Длина главного корня сеянцев данной группы была выше, чем у сеянцев группы Б, на 2.1–4.9%. Количество придаточных корней было выше у сеянцев популяции Бузулукского района (до 10.2%), длина придаточных корней также была выше (0.84–7.61%). При этом в контроле сеянцы популяции Бузулукского района были равными или превышали по длине главного и придаточных корней (до 0.9%) (табл. 2).

Наночастицы Fe оказывали стимулирующее действие на рост сеянцев. Максимальный эффект проявлялся при концентрации 25 ммоль/л. При максимальной опытной концентрации наночастицы Fe снижали длину побега и подавляли формирование корневой системы. Морфобиологическая реакция сеянцев *P. sylvestris* на присутствие в среде наночастиц Fe менее выражена по сравнению с реакцией на присутствие в среде наночастиц Си. Устойчивость сеянцев группы А была

также выше. Длина главного корня сеянцев данной популяции была выше, чем у сеянцев группы Б, на 0.39–2.23%. Количество придаточных корней было выше у сеянцев группы Б (до 3.1%), их длина также была выше (0.55–1.04%).

Анализ содержания наночастиц Си и Fe в контрольной группе сеянцев свидетельствует о достаточной обеспеченности ими растения и преимущественном накоплении в корневой системе (табл. 3).

Увеличение концентрации наночастиц Си в среде сопровождалось ростом его содержания и в осевых органах сеянцев. При этом характер увеличения не зависел от генетической принадлежности семян. Так, воздействие 100 ммоль Си приводило к увеличению содержания этого металла в корневой системе сеянцев группы А в 3.13 раза по сравнению с контролем, группы Б – в 3.19 раза, а в стволиках – в 2.85 и 2.87 раза соответственно.

Изменение концентрации наночастиц Fe во всех экспериментальных растениях было на одном уровне и отличалось в стволиках сеянцев группы А в 1.06–1.42 раза по сравнению с контролем, группы Б – 1.06–1.36 раза, в корневой системе сеянцев в 1.55–1.60 и 1.48–1.55 раза соответственно. Содержание Fe в корневой системе се-

**Таблица 2.** Морфометрические показатели сеянцев *Pinus sylvestris* при культивировании в среде, содержащей наночастицы Fe

Группа	Длина главного корня, мм	Количество придаточных корней, шт.	Длина придаточных корней, мм	Высота стволика, мм	Диаметр корневой шейки, мм
Контроль					
А	97.7 ± 4.92*	2.09 ± 0.05*	75.4 ± 3.8*	34.2 ± 1.2	1.22 ± 0.02
Б	97.9 ± 4.94	2.09 ± 0.06	75.8 ± 3.7	34.5 ± 1.1	1.24 ± 0.02
100 ммоль/л					
А	76.2 ± 8.54	2.24 ± 0.2	72.9 ± 3.6	32.2 ± 1.1	1.21 ± 0.02
Б	75.9 ± 8.22	2.17 ± 0.2	73.5 ± 3.8	31.9 ± 1.1	1.22 ± 0.02
25 ммоль/л					
А	120.6 ± 7.6	2.12 ± 0.19	86.2 ± 3.2	36.7 ± 1.3	1.19 ± 0.02
Б	117.9 ± 7.4	2.10 ± 0.18	87.1 ± 3.6	35.8 ± 1.2	1.21 ± 0.02
6.25 ммоль/л					
А	100.2 ± 7.51	2.11 ± 0.16	87.3 ± 4.9	34.8 ± 1.4	1.16 ± 0.02
Б	98.4 ± 7.42	2.08 ± 0.14	88.2 ± 5.3	34.4 ± 1.3	1.18 ± 0.01
1.56 ммоль/л					
А	96.4 ± 7.9	2.14 ± 0.14	85.8 ± 4.93	29.2 ± 1.3	1.03 ± 0.01
Б	96.2 ± 7.4	2.13 ± 0.14	86.1 ± 5.11	29.1 ± 1.2	1.05 ± 0.01
0.39 ммоль/л					
А	107.2 ± 6.8	2.21 ± 0.14	72.7 ± 4.11	32.8 ± 1.3	1.18 ± 0.02
Б	106.6 ± 6.7	2.17 ± 0.12	73.1 ± 4.23	32.6 ± 1.2	1.16 ± 0.02

\*  $p < 0.05$ .**Таблица 3.** Содержание Cu и Fe в сеянцах *Pinus sylvestris* L. в эксперименте (мкмоль/г сухой массы)

Концентрация	Стволик				Корневая система			
	группа А		группа Б		группа А		группа Б	
	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe	Cu	Fe
Контроль	12.56	3.1	12.98	3.3	55.73	21.1	56.10	22.4
100 ммоль/л	36.11	4.4	37.32	4.5	174.93	33.8	179.03	33.9
25 ммоль/л	29.33	3.6	30.11	3.8	162.17	33.7	174.26	34.0
6.25 ммоль/л	24.65	3.9	25.24	4.1	154.84	33.8	159.35	34.3
1.56 ммоль/л	17.41	4.2	17.93	3.9	89.27	33.6	90.76	34.8
0.39 ммоль/л	13.27	3.3	13.57	3.5	62.69	32.7	63.18	33.2

янцев популяции Б превышало данный показатель у сеянцев группы А.

Проведенный анализ морфобиологических показателей сеянцев, культивированных в среде с присутствием наночастиц Cu, не позволил выявить значимых различий в изменении частоты прорастания семян. Угнетение роста корневой системы происходило при концентрации наночастиц Cu 6.25 ммоль/л и выше. При максимальных концентрациях (100 ммоль/л) происходило подавление роста побега. Что касается влияния на-

ночастиц Fe, то при всех концентрациях значимых различий морфобиологических реакций сеянцев групп А и Б не обнаружено (табл. 4). Изменение всех исследуемых параметров происходило при максимальной концентрации наночастиц Fe (100 ммоль/л).

Полученные результаты исследования подтверждаются данными отечественных ученых, которые также отмечают фитотоксичность наночастиц Cu [2, 19, 25]. Общемировые исследования подтверждают, что основное действие наноча-

**Таблица 4.** Значение верхнего предела толерантности *Pinus sylvestris* к наночастицам, ммоль/л

Нано-частицы	Исследуемые параметры		
	Всхожесть семян	Рост побега	Рост корня
Cu	>98	>98	6.25
Fe	>98	>98	>98

стицы металлов оказывают именно на корневую систему растений [13, 17].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Естественные массивы *P. sylvestris* в пределах юго-западной границы ареала на стыке геоморфологических районов и флористических областей в пределах Оренбургской области характеризуются высоким генетическим разнообразием. В результате анализа главных компонент и проведенных ранее исследований [18] выборка реликтовых сосен поделилась на две генетически различные группы: европейскую и азиатскую. Морфобиологическая реакция сеянцев *P. sylvestris*, полученных из семян, собранных в популяциях из указанных выше групп (европейской – Бузлукский бор, азиатской – реликтовые сосны Кваркенского района), и уровень накопления в осевых органах наночастиц Cu и Fe имеют различия. Так, морфобиологическая реакция сеянцев *P. sylvestris* группы А менее выражена по сравнению с сеянцами группы Б. Причиной тому может служить генетически заложенная адаптация сосен Кваркенского района к повышенному геохимическому фону Cu и Fe [21].

В ходе исследований была выявлена низкая толерантность рассматриваемых популяций *P. sylvestris* к действию наночастиц Cu. Проведенные исследования проростков *in vitro* с присутствием наночастиц Cu выявили значительные морфобиологические изменения корневой системы. Установлено, что присутствие в среде наночастиц Cu не изменяло всхожесть семян, однако при максимальной опытной концентрации (100 ммоль/л) снижало длину побега и подавляло формирование корневой системы.

Еще одним фактором, свидетельствующим о низкой толерантности *P. sylvestris* к воздействию Cu, является определенное подавление частоты всхожести, длины побега и корней в эксперименте с присутствием в среде Cu. При наличии в среде наночастиц Cu было выявлено незначительное подавление роста корневой системы.

Был выявлен достоверный эффект подавления роста *P. sylvestris* при культивировании в среде, содержащей наночастицы Fe. В диапазоне 6.25–25 ммоль/л отмечалось увеличение придаточных корней, что может рассматриваться в качестве

компенсаторной реакции на подавление роста главного корня. Полученные данные согласуются с данными отечественных и зарубежных авторов о влиянии наночастиц Cu и Fe на травянистые виды и водоросли [26–37].

Таким образом, морфобиологическая реакция сеянцев *P. sylvestris* взаимосвязана с генотипом популяции. При одинаковых условиях культивирования из семян генетически различных популяций более толерантными к действию наночастиц Cu и Fe оказались сеянцы популяций Кваркенского района, в котором отмечается геохимическая аномалия по этим элементам в почвах. Данный факт указывает на генетическую адаптацию к действию Cu и Fe, присутствующих в окружающей среде.

Результаты исследования определяют целесообразность рекомендовать лесным питомникам и лесничествам при проведении предпосевной обработке семян препаратами, содержащими наночастицы Cu и Fe, учитывать их действие в различных концентрациях на рост и развитие сеянцев *P. sylvestris*. Проводить генетический контроль посевного материала различных популяций с учетом фактора морфобиологических реакций на действие наночастиц Cu и Fe.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов Г.В., Желанкин Р.В., Арсентьева И.П. и др. // Конструкции из композиционных материалов. 2007. № 3. С. 20.
2. Шигапова А.И., Шигапов З.Х. // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. 2009. Вып. 6. С. 445.
3. Короткова А.М., Лебедев С.В., Каюмов Ф.Г. и др. // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 1. С. 172.
4. Короткова А.М., Лебедев С.В. // Сб. Перспективы науки-2015. Сб. докл. I Междунар. заочного конкурса научно-исследовательских работ / Под ред. Гумерава А.В. Казань: Знание, 2015. С. 132.
5. Прасад М.Н. // Физиология растений. 2003. Т. 50. № 5. С. 768.
6. Калашикова Е.А. // Вестн. МГУЛ. Лесной вестник. 2012. № 7. С. 65.
7. Вардуни Т.В., Капралова О.А., Дмитриев П.А. и др. // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2017. № 8 (99). С. 31.
8. Виноградов Д.В., Потапова Л.В. // Международный технико-экономический журнал. 2009. № 3. С. 37.
9. Гродницкая И.Д. // Хвойные бореальной зоны. 2006. № 1. С. 137.
10. Некрасова Г.Ф., Ушакова О.С., Ермаков А.Е. и др. // Экология. 2011. № 6. С. 422.
11. Фадькин Г.Н. // Юбилейный сб. науч. тр. студентов, аспирантов и преподавателей агроэколог. фак., посвящ. 110-летию со дня рождения проф. И.С. Травина. 2010. С. 158.

12. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Голубев И.Г. и др. // Российские нанотехнологии. 2015. Т. 10. № 3–4. С. 126.
13. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н. и др. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.
14. Brooks R.R. Plants that hyperaccumulate heavy metals. Wallingford: CAB International, 1998. 384 p.
15. Yang X.E., Long X.X., Ye H.B. et al. // Plant Soil. 2004. V. 259. P. 181.
16. Паничкин Л.А., Райкова А.П. // Изв. ТСХА. 2009. Вып. 1. С. 59.
17. Чурилов Г.И., Сушилина М.М. // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий: сб. науч. тр. Вып. 3. Рязань: Изд-во ВНИИГиМ, 2008. С. 84.
18. Rjabuchina M.V., Kalyakina R.G., Friesen N. // Turczaninowia. 2020. V. 23 (1). P. 116.  
<https://doi.org/10.14258/turczaninowia.23.1.12>
19. Рябинина З.Н., Князев М.С. Определитель сосудистых растений Оренбургской области. М.: Изд-во КМК, 2009. 758 с.
20. Чибилёв А.А. // Степи Северной Евразии: материалы VII междунар. симпози. Оренбург: Димур, 2015. С. 916.
21. Климентьев А.И. // Вопросы степеведения. 2005. № 4. С. 83.
22. Методические указания 1.2. 2635-10 Медико-биологическая оценка безопасности наноматериалов. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.
23. ГОСТ 15150 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
24. Галактионова Л.В., Губайдуллина И.З. // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2017. № 3 (65). С. 196.
25. Битюцкий Н.П. Необходимые микроэлементы растений. СПб.: ДЕАН, 2005. 256 с.
26. Прудников А.Д., Прудникова А.Г. // Сб. Научное обеспечение инновационного развития агропромышленного комплекса регионов РФ (Курганская ГСХА). Матер. Междунар. научно-практической конф. 2018. С. 612.
27. Райкова А.П., Паничкин Л.А., Райкова Н.Н. // Нанотехнологии и информационные технологии XXI века. 2006. С. 69.
28. Цицуашвили В.С., Минкина Т.М., Невидомская Д.Г. и др. // Вестн. аграрной науки Дона. 2017. Т. 3. № 39. С. 93.
29. Belava V.N., Panyuta O.O., Yakovleva G.M. et al. // Nanoscale Res Lett. 2017. V. 12. P. 250.
30. Cyrusová T., Petrová Š., Vaněk T. et al. // Water Air Soil Pollut. 2017. P. 228.
31. Da Costa M.V.J., Sharma P.K. // Photosynthetica. 2016. V. 54. P. 110.
32. Din M.I., Ashad F., Hussain Z. et al. // Nanoscale Res Lett. 2017. V. 12. P. 638.
33. Kasana R.C., Panwar N.R., Kaul R.K. et al. // Environ. Chem. Lett. 2017. V. 15. № 2. P. 233.
34. Nekrasova G.F., Ushakova O.S., Ermakov A.E. et al. // Russ. J. Ecol. 2011. V. 42. P. 458.
35. Rajput V.D., Minkina T., Suskova S. et al. // BioNanoSci. 2018. V. 8. P. 36.
36. Ryabinina Z.N., Ryabukhina M.V., Kolodina M.V. // Nano Hybrids. 2017. T. 13. P. 156.
37. Taran N., Storozhenko V., Svetlova N. et al. // Nanoscale Res. Lett. 2017. V. 12. P. 60.