

УДК 57.084

UDC 57.084

03.00.00 Биологические науки

Biology

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН ОЗИМОГО ЯЧМЕНЯ**EFFECT OF GOLD NANOPARTICLES ON SEEDS GERMINATION OF WINTER BARLEY**

Плотников Владимир Константинович
д.б.н., доцент
vkpbio21@mail.ru
ID: 3971-2200

Plotnikov Vladimir Konstantinovich
Dr.Sci.Biol., Associate Professor
vkpbio21@mail.ru

Салфетников Анатолий Алексеевич
д.с.-х.н., профессор
Salfetnikov39@mail.ru
ID: 9677-3687
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Salfetnikov Anatoly Alexeevich
Dr.Sci.Agr., Professor
Salfetnikov39@mail.ru
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Голубев Александр Андреевич
аспирант
golubev_a@ibppm.ru
Scopus ID: 56532333900

Golubev Alexander Andreevich
Postgraduate student
golubev_a@ibppm.ru

Дыкман Лев Абрамович
д.б.н., доцент
dykman_1@ibppm.ru
Scopus ID: 6603809508
Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов Российской академии наук, Саратов, Россия

Dykman Lev Abramovich
Dr.Sci.Biol., Associate Professor
dykman_1@ibppm.ru
Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

В статье представлены результаты исследований влияния наночастиц (15 нм и 50 нм) золота (ЗНЧ) на прорастание семян и рост 3-х суточных этиолированных coleoptiles и корней. По сравнению с дистиллированной водой (контроль) исходные коллоидные растворы (57 мкг/мл) ЗНЧ как 15-нм, так и 50-нм не оказывали существенного эффекта на прорастание семян, а также на рост coleoptiles и корней. Однако в обоих случаях отмечалась слабая тенденция к стимуляции роста coleoptiles и ингибированию роста корней. Снижение концентрации 15-нм ЗНЧ до 10 мкг/мл и 1 мкг/мл не изменяло роста проростков, но стимулировало прорастание семян в 2 раза. Аналогичные концентрации 50-нм ЗНЧ оказывали стимулирующее действие как на прорастание семян (в 2 раза), так и на рост coleoptiles и корней. Особенно интенсивно росли проростки на коллоидном растворе ЗНЧ с концентрацией Au 10 мкг/мл. Однако повышение температуры на 2 градуса (с 25°C до 27°C) приводило к усилению роста контрольных 3-х суточных проростков и противоположному действию 50-нм ЗНЧ: coleoptiles и корни отставали в росте от контрольных проростков на 16-17%. Однако на 4-е сутки при температуре 27°C происходило относительное замедление

The article presents experimental data on the research of gold nanoparticles (GNPs) with mean diameter 15 nm and 50 nm effect on seeds germination and growth of 3-day-old etiolated coleoptiles and roots. Compared with distilled water (control) initial colloidal solution of 15 nm and 50 nm GNPs (57 µg/ml) had no significant impact on seeds germination and growth of coleoptiles and roots. However, in both cases a weak tendency to stimulation of the coleoptile growth and root growth inhibition was observed. Reduction of 15 nm GNPs concentration down to 10 µg/ml and 1 µg/ml had not effect on the growth of the seedlings, but stimulated seed germination up to twofold. Similar concentrations of 50 nm GNPs exerted the stimulating effect on seed germination (twofold) and the growth of root and coleoptiles. Seedlings grew especially intensive in colloidal GNPs solution with Au concentration of 10 µg/ml. Temperature rise of 2 degrees (from 25°C to 27°C) resulted in growth increase of control 3-day-old seedlings and opposite effect of 50 nm GNPs: coleoptiles and roots growth fell behind control seedlings growth by 16-17%. However, on the 4th day, the relative growth slowdown of control seedlings occurred at 27°C and growth stimulation effect under the influence of 50 nm GNPs appeared again. Over time, the stimulating effect of 50 nm GNPs decreased: at the end of

роста контрольных проростков, и на этом фоне вновь проявлялся эффект стимуляции роста под влиянием 50-нм ЗНЧ. С течением времени стимулирующий эффект 50-нм ЗНЧ снижался: в конце октября он ослабел, а в ноябре – начале декабря отсутствовал для корней, и наблюдалось снижение роста coleoptiles. Однако, во всех случаях сохранялся эффект стимуляции прорастания семян под влиянием 50-нм ЗНЧ, который к декабрю тоже стал слабеть. Выдвигаются гипотезы о молекулярных механизмах биологического действия ЗНЧ

Ключевые слова: ЯЧМЕНЬ, ПРОПАСТАЮЩЕЕ ЗЕРНО, РОСТ КОЛЕОПТИЛЕЙ И КОРНЕЙ, НАНОЧАСТИЦЫ ЗОЛОТА

October it weakened, and in November – beginning of December, it was no observed for the roots, and there was a decline in coleoptiles growth. However, in all cases the effect of stimulation of seeds germination persisted under the influence of 50 nm GNPs, weakening by December. We hypothesize the molecular mechanisms of biological action of GNPs

Keywords: BARLEY, SEED GERMINATION, GROWTH OF COLEOPTILES AND ROOTS, GOLD NANOPARTICLES

Doi: 10.21515/1990-4665-127-018

Введение

В последнее время большое внимание уделяется биологическим эффектам и токсикологическим свойствам наночастиц металлов и их оксидов [19]. Особый интерес вызывают наночастицы физиологически значимых металлов: меди, железа, цинка, хрома, кобальта, селена, молибдена, марганца, золота, серебра и магния. Их растворимость, стойкость, химическая активность и время проникновения в клетку значительно отличаются от таковых для частиц больших размеров и массивных материалов.

Наиболее интересны наночастицы золота, так как к настоящему времени разработаны удобные протоколы получения этих наночастиц различного размера (от 1 до 200 нм), формы (сферы, стержни, звезды и т.п.) и структуры (нанооболочки, наноклетки, наноожерелья и т.п.). Помимо большого количество публикаций, посвященных использованию золотых наночастиц (ЗНЧ) в различных областях нанобиотехнологии, включая биосенсорику и геномику, визуализацию и фототермолиз раковых клеток [2, 3, 5, 12], за последние 10-12 лет в мировой научной литературе появились сведения о воздействии ЗНЧ на сельскохозяйственные растения [4, 20].

Одной из первых статей, посвященных токсичности наночастиц по отношению к растениям, грибам и водорослям, является работа Navarro с соавт. [21]. Авторы справедливо замечают, что клеточная стенка (структура, специфичная для растений, грибов и водорослей) является как первичным звеном взаимодействия с наночастицами, так и барьером для их проникновения в клетку. Клеточная стенка позволяет проходить малым молекулам или частицам и лимитирует проникновение крупных молекул. Диаметр пор (в среднем 5-20 нм) ограничивает размер наночастиц, способных проникнуть через клеточную стенку. Однако авторы отмечают, что наночастицы могут сами модулировать размер пор и, таким образом, снимать жесткие структурные ограничения клеточной стенки и доходить до плазмалеммы [21]. Предполагается, что на следующем этапе наночастицы могут проникать внутрь клетки путем эндоцитоза, однако этот процесс для клеток растений изучен недостаточно.

Показано увеличение высоты и диаметра стебля, количества листьев и побегов, повышение урожайности у горчицы (*Brassica juncea* L.) [11] и табака (*Nicotiana tabacum* L.) [18], увеличение всхожести семян и прирост биомассы у кукурузы (*Zea mays* L.) [22] и африканского проса (*Pennisetum glaucum* L.) [23] под воздействием ЗНЧ. Эти факты позволяют говорить о возможности принципиально нового расширения арсенала биологически активных веществ. Имеются данные и об отрицательном влиянии ЗНЧ на растения: у табака наблюдали некротические повреждения листьев при воздействии мелких (3.5 нм) ЗНЧ. При этом добавление крупных наночастиц (18 нм) не приводило к эффектам, отличным от контроля [25]. У лука (*Allium cepa* L.) фитотоксичность ЗНЧ наблюдалась в виде увеличения хромосомных aberrаций и снижения митотического индекса [24]. На примере сои (*Glycine max* L.) [13] и тыквы (*Cucurbita pepo* L.) [17] продемонстрировано отсутствие влияния ЗНЧ на морфофункциональные характеристики растения.

Биологически активными веществами обычно называют органические вещества различной сложности, способные изменять скорость обмена веществ в организме. В частности, широкое применение они нашли в области повышения стрессоустойчивости и урожайности сельскохозяйственных растений, способствуя наиболее полной реализации их генетического потенциала. Сообщения о биологической активности наночастиц металлов и их оксидов открывают новую страницу в возможностях управления метаболизмом растения при помощи экзогенных веществ неорганической природы.

Несомненными факторами, влияющими на процессы внутриклеточного проникновения и характера биологических эффектов наночастиц, являются их химическая природа, размер, форма, поверхностный заряд, доза введения. Анализ литературных данных, зачастую неполных и противоречивых, приводит к выводу о необходимости скоординированной программы исследований, которая выявила бы корреляции между параметрами частиц, дизайном эксперимента и наблюдаемыми биологическими эффектами [4].

Отметим, что у животных наиболее токсичными, влияющими на целостность ДНК, являются ЗНЧ малого размера (5 нм), а наиболее активно внедряются в организм и концентрируются в основном в печени и селезенке относительно крупные наночастицы (50 нм) [19].

Показано, что проростки ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), культивируемые 2 недели на гидропонной среде, содержащей 1-10 мкг/мл ЗНЧ размером 10 нм, накапливали наночастицы и в листьях, и в корнях. При этом имел место концентрационный эффект: чем выше концентрация наночастиц в среде, тем более подавлялся рост листьев и корней. Однако при этом наблюдался эффект гормезиса – минимальная концентрация (1 мкг/мл) усиливала рост листьев в среднем на 10%, а корней в среднем на

60% [14]. Гормезис – это явление стимулирующего действия умеренных доз стрессоров, недостаточных для проявления повреждающих эффектов.

В связи с этим, представляло несомненный интерес проверить эффективность действия относительно крупных ЗНЧ (15 нм и 50 нм) на прорастание семян, а также рост coleoptилей и корней озимого ячменя в краткосрочных экспериментах.

Материалы и методы

Приготовление золотых наночастиц

Наночастицы золота сферической формы со средним диаметром 15 и 50 нм синтезировали цитратным методом [16], используя реакцию восстановления золотохлористоводородной кислоты (Sigma-Aldrich, США) цитратом натрия (Fluka, Швейцария). Восстановление проводили при нагревании 250 мл 0.01% водного раствора золотохлористоводородной кислоты в колбе Эрленмейера на магнитной мешалке с обратным водяным холодильником до 100°C. Затем добавляли 7.75 мл 1% водного раствора цитрата натрия для получения наночастиц размером 15 нм или 2.2 мл для получения наночастиц размером 50 нм. Продолжали кипячение еще 30 мин, наблюдали образование золя красного цвета. Свежеприготовленные растворы еще горячим разливали в стерильные стеклянные флаконы с плотно закрывающимися крышками и хранили при 4°C.

Проращивание семян ячменя

Работу проводили осенью-зимой 2016 г. В экспериментах использовали семена озимого ячменя сорта Самсон селекции Краснодарского научно-исследовательского института сельского хозяйства им. П.П. Лукьяненко урожая 2015 г. Для исследования использовали 3-х суточные этиолированные проростки. Все эксперименты проводили в темноте в течение 3-х суток. Исходный коллоидный раствор ЗНЧ (15 или 50 нм) с концентрацией Au 57 мкг/мл разбавляли дистиллированной водой

до концентраций 10 мкг/мл и 1 мкг/мл. Вносили по 10 мл на чашку Петри (9 см в диаметре) со 100 семенами ячменя, предварительно помытыми водопроводной, а затем дистиллированной водой. В каждом эксперименте использовали 2 контрольные (дистиллированная вода) и 2 опытные чашки Петри.

Результаты и их обсуждение

Синтезированные золотые наносферы были охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии, спектрофотометрии и динамического светорассеяния [2]. По данным измерений средний диаметр золотых наносфер 15 нм составлял 15.3 нм, $\lambda_{\max}=518.1$ нм, $A_{520}=1.1$, число частиц в 1 мл – 1.6×10^{12} ; для 50 нм частиц, соответственно, диаметр – 48.6 нм, $\lambda_{\max}=534.7$ нм, $A_{520}=1.15$, число частиц в 1 мл – $6,6 \times 10^{10}$. Концентрация золота была постоянной и составляла 57 мкг/мл.

Поскольку при хранении семян происходят различные биохимические процессы, меняющие их свойства, в таблицах, содержащих экспериментальные данные по действию ЗНЧ на прорастание семян и рост проростков ячменя, указывали дату проведения эксперимента, а также температуру, которая может кардинально изменить характер роста проростков и, соответственно, характер действия ЗНЧ на изучаемые показатели. В таблицах даны средние арифметические значения роста coleoptiles и корней в см.

По сравнению с дистиллированной водой (контроль) исходные коллоидные растворы (57 мкг/мл) ЗНЧ как 15-нм, так и 50-нм не оказывали существенного эффекта на прорастание семян, а также на рост coleoptiles и корней. Однако в обоих случаях отмечалась слабая тенденция к стимуляции роста coleoptiles и ингибированию роста корней (табл. 1 и 2).

Снижение концентрации 15-нм ЗНЧ до 10 мкг/мл и 1 мкг/мл не изменяло роста проростков, но стимулировало прорастание семян в 2 раза (табл. 1). Иногда в опытном варианте на отдельных проростках происходило превращение coleoptily в лист, чего никогда не наблюдалось в контрольном варианте.

Таблица 1. Степень прорастания семян ячменя и рост coleoptily и корней под действием 15-нм ЗНЧ

(30 сентября 2016 г., 3-х суточные этиолированные проростки, температура 25°C)

Концентрация золота	Колеоптиль, см	Главный корень, см	Относительная величина прорастания, %
Контроль (H ₂ O)	2.61 (100%)	6.10 (100%)	100
57 мкг/мл	2.97 (114%)	5.49 (90%)	100
10 мкг/мл	2.95 (113%)	6.10 (100%)	200
1 мкг/мл	2.64 (100%)	5.72 (94%)	200

Аналогичные концентрации 50-нм ЗНЧ оказывали стимулирующее действие как на прорастание семян (в 2 раза), так и на рост coleoptily и корней. Особенно интенсивно росли проростки на коллоидном растворе ЗНЧ с концентрацией Au 10 мкг/мл (табл. 2).

Однако повышение температуры на 2 градуса (с 25°C до 27°C) приводило к усилению роста контрольных 3-х суточных проростков и противоположному действию 50-нм ЗНЧ: coleoptily и корни отставали в росте от контрольных проростков на 16-17% (табл. 3). Однако на 4-е сутки при температуре 27°C происходило относительное замедление роста контрольных проростков, и на этом фоне вновь проявлялся эффект стимуляции роста под влиянием 50-нм ЗНЧ (табл. 4).

Таблица 2. Степень прорастания семян ячменя и роста coleoptily и корней под действием 50-нм ЗНЧ

(23 сентября 2016 г., 3-х суточные этиолированные проростки, температура 25°C)

Концентрация золота	Колеоптиль, см	Главный корень, см	Относительная величина прорастания, %
Контроль(H ₂ O)	2.34 (100%)	4.48 (100%)	100
57 мкг/мл	2.42 (103%)	3.96 (88%)	100
10 мкг/мл	3.37 (144%)	6.27 (140%)	200
1 мкг/мл	2.84 (121%)	5.46 (122%)	200

Таблица 3. Изменения роста coleoptилей и корней под действием 50-нм ЗНЧ (6 октября 2016 г., 3-х суточные этиолированные проростки, температура 27°С)

Концентрация золота	Колеоптиль, см	Главный корень, см
Контроль(H ₂ O)	3.22 (100%)	5.99 (100%)
10 мкг/мл	2.68 (83%)	5.01 (84%)
1 мкг/мл	3.04 (94%)	6.05 (101%)

Таблица 4. Изменения роста coleoptилей и корней под действием 50-нм ЗНЧ (7 октября 2016 г., 4-х суточные этиолированные проростки, температура 27°С)

Концентрация золота	Колеоптиль, см	Главный корень, см
Контроль(H ₂ O)	4.00 (100%)	5.87 (100%)
10 мкг/мл	5.22 (131%)	7.18 (122%)
1 мкг/мл	4.36 (109%)	6.05 (100%)

С течением времени стимулирующий эффект 50-нм ЗНЧ снижался: в конце октября он ослабел, а в ноябре – начале декабря отсутствовал для корней, и наблюдалось снижение роста coleoptилей (табл. 5). Однако, во всех случаях сохранялся эффект стимуляции прорастания семян под влиянием золотых 50-нм ЗНЧ, который к декабрю тоже стал слабеть (табл. 5).

Таблица 5. Изменения степени прорастания семян ячменя и роста coleoptилей и корней под действием 50-нм ЗНЧ (3-х суточные этиолированные проростки, температура 25°С)

Концентрация золота	Колеоптиль, см	Главный корень, см	Относительная величина прорастания, %
<i>27 октября 2016 г.</i>			
Контроль(H ₂ O)	2.82 (100%)	4.88 (100%)	100
10 мкг/мл	2.76 (100%)	5.78 (118%)	200
<i>28 октября 2016 г.</i>			
Контроль(H ₂ O)	3.52 (100%)	5.84 (100%)	100
10 мкг/мл	4.00 (114%)	7.26 (124%)	200
<i>18 ноября 2016 г.</i>			
Контроль(H ₂ O)	3.17 (100%)	5.51 (100%)	100
10 мкг/мл	2.91 (92%)	5.99 (109%)	170
<i>2 декабря 2016 г.</i>			
Контроль(H ₂ O)	2.92 (100%)	5.24 (100%)	100
10 мкг/мл	2.42 (83%)	5.12 (98%)	140

Поскольку, как отмечалось выше, в ходе хранения семян в них происходят самые различные биохимические процессы, не исключено, что ЗНЧ способны взаимодействовать непосредственно с веществами,

ингибирующими прорастание семян и рост проростков. Количество и свойства этих веществ зависят от срока хранения семян. Возможно, этим объясняется вариативность действия ЗНЧ на рост проростков. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что ингибитор транскрипции (синтеза РНК) актиномицин Д циклически меняет способность влиять на рост coleoptилей проростков, то снижая, то увеличивая его в зависимости от времени хранения семян. Это позволяет предположить, что по мере хранения зерна актиномицин Д приобретает способность частично связываться с ингибиторами роста растений в результате изменения их свойств, что стимулирует рост coleoptилей при концентрации 20 мкг/мл у озимой мягкой пшеницы и 40 мкг/мл у озимого ячменя [9].

Зрелые семена различных сортов озимого ячменя содержат разное количество экстрагируемых дистиллированной водой катионов магния (Mg^{++}). При этом высоко морозоустойчивые и средне морозоустойчивые сорта превосходят по содержанию этих катионов слабо морозоустойчивые сорта [7]. Проращивание семян озимого ячменя на растворе Трилона Б (ЭДТА- Na_2) приводило к сортоспецифическому снижению роста coleoptилей и корней 3-х суточных этиолированных проростков, а также к снижению всхожести семян. При этом относительно морозоустойчивые сорта были более устойчивы к действию Трилона Б, способного связывать двухвалентные катионы [10].

Наночастицы коллоидного золота, напротив, приводили к интенсификации роста coleoptилей и корней озимого ячменя, а также к повышению всхожести. Можно полагать, что ЗНЧ, заряженные отрицательно, не связывали водорастворимые положительно заряженные катионы магния.

Как же объяснить усиления прорастания и интенсификацию роста проростков? Известно, что усиление роста coleoptилей 4-х суточных

зеленых проростков озимой мягкой пшеницы под влиянием повышения температуры, а также под воздействием биологически активных веществ определяется стабилизацией суммарной поли-(А)-содержащей мРНК, что в свою очередь приводит к усилению синтеза белка [1, 8]. Если предположить, что усиление роста проростков озимого ячменя под влиянием ЗНЧ происходит по этой же причине, то нужно допустить, что проникшие в клетку ЗНЧ способны снизить содержание катионов магния в молекулах мРНК. Это приводит к стабилизации мРНК, так как определенные структуры (шпильки) в молекулах мРНК держатся за счет катионов магния. Эти структуры являются местами взаимодействия с белками, осуществляющими деаденилирование мРНК с последующим снижением времени ее жизни или распадом [8,15]. Однако, эта гипотеза требует экспериментального подтверждения. В пользу этой гипотезы, по-видимому, свидетельствуют те факты, что ЗНЧ способны взаимодействовать с нуклеиновыми кислотами и влиять на их структуру [6].

Описанные в настоящей статье эффекты действия ЗНЧ на прорастание семян и рост проростков ячменя является основанием для дальнейших более широких исследований динамики влияния наночастиц на физиологические процессы и более глубокого изучения молекулярных механизмов изменения метаболизма растения при его взаимодействии с ЗНЧ.

Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 16-04-00520.

Литература

1. Бакалдина Н.Б., Алексеенко Ж.В., Плотников В.К. Холодоиндуцированные изменения стабильности мРНК субъединицы альфа фактора элонгации трансляции 1 у проростков пшеницы и ячменя // Физиология растений. 2001. Т. 48. С. 879-885.

2. Богатырев В.А., Дыкман Л.А., Краснов Я.М., Плотников В.К., Хлебцов Н.Г. Метод дифференциальной спектроскопии рассеянного света для исследования биоспецифических реакций в системах конъюгатов золотых наночастиц с белками или олигонуклеотидами // Коллоидный журнал. 2002. Т. 64. С. 745-755.

3. Богатырев В.А., Дыкман Л.А., Хлебцов Б.Н., Плотников В.К., Хлебцов Н.Г. Оптические свойства конъюгатов коллоидного золота с олиготимидином и их изменение при реакции гибридизации с полиадениловой кислотой // Коллоидный журнал. 2005. Т. 67. С. 458-468.

4. Дыкман Л.А., Богатырев В.А., Соколов О.И., Плотников В.К., Репко Н.В., Салфетников А.А. Взаимодействие наночастиц золота, серебра и магния с растительными объектами // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 120. С. 675-705.

5. Дыкман Л.А., Щеголев В.А., Богатырев С.Ю., Хлебцов Н.Г. Золотые наночастицы: синтез, свойства, биомедицинское применение. - М.: Наука, 2008. 316 с.

6. Евдокимов Ю.М., Скуридин С.Г., Саянов В.И., Попенко В.И., Штыкова Э.В., Хлебцов Н.Г., Шафеев Г.А., Кац Е.И. Наночастицы золота влияют на «узнавание» двухцепочечных молекул ДНК и запрещают формирование их холестерической структуры // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2014. Т. 14. С. 5-21.

7. Насонов А.И., Евтушенко Я.Ю., Серкин Н.В., Плотников В.К. Особенности состава зерна среднemosозоустойчивых сортов ячменя // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2012. Т. 1. С. 104-106.

8. Плотников В.К. Биология РНК зерновых культур. - Краснодар: Эдви, 2009. 375 с.

9. Плотников В.К., Репко Н.В., Салфетников А.А. Цикличность влияния атиномицина Д на рост coleoptилей ячменя // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного университета. 2015. № 107. С. 1352-1371.

10. Плотников В.К., Смирнова Е.В., Репко Н.В., Салфетников А.А. Сортоспецифичность действия трилона Б на прорастания семян озимого ячменя // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 120. С. 706-729.

11. Arora S., Sharma P., Kumar S., Nayan R., Khanna P.K., Zaidi M.G.H. Gold nanoparticle induced enhancement in growth and seed yield of *Brassica juncea* // Plant Growth Regul. 2012. V. 66. P. 303-310.

12. Dykman L.A., Khlebtsov N.G. Gold nanoparticles in biomedical applications: recent advances and perspectives // Chem. Soc. Rev. 2012. V. 41. P. 2256-2282.

13. Falco W.F., Botero E.R., Falcao E.A., Santiago E.F., Bagnato V.S., Caires A.R.L. *In vitro* observation of chlorophyll fluorescence quenching induced by gold nanoparticles // J. Photochem. Photobiol. A. 2011. V. 225. P. 65-71.

14. Feichtmeier N.S., Walther P., Leopold K. Uptake, effects, and regeneration of barley plants exposed to gold nanoparticles // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2015. V. 22. P. 8549-8558.

15. Fialcowitz E.J., Brewer B.Y., Keenan B.P., Wilson G.M. A hairpin-like structure within an AU-rich mRNA-destabilizing element regulates trans-factor binding selectivity and mRNA decay kinetics // J. Biol. Chem. 2005. V. 280. P. 22406-22417.

16. Frens G. Controlled nucleation for the regulation of the particle size in monodisperse gold suspensions // Nature Phys. Sci. 1973. V. 241. P. 20-22.

17. Hawthorne J., Musante C., Sinha S.K., White J.C. Accumulation and phytotoxicity of engineered nanoparticles to *Cucurbita pepo* // Int. J. Phytorem. 2012. V. 14. P. 429-442.

18. Judy J.D., Unrine J.M., Bertsch A.M. Evidence for biomagnification of gold nanoparticles within a terrestrial food chain // *Environ. Sci. Technol.* 2011. V. 45. P. 776-781.
19. Khlebtsov N.G., Dykman L.A. Biodistribution and toxicity of engineered gold nanoparticles: A review of *in vitro* and *in vivo* studies // *Chem. Soc. Rev.* 2011. V. 40. P. 1647-1671.
20. Nanotechnology and Plant Sciences. Nanoparticles and their Impact on Plants // Eds. Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H., Mohammad F. - N.-Y.: Springer. 2015. 305 p.
21. Navarro E., Baun A., Behra R., Hartmann N.B., Filser J., Miao A.-J., Quigg A., Santschi P.H., Sigg L. Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi // *Ecotoxicology.* 2008. V. 17. P. 372-386.
22. Mahakham W., Theerakulpisut P., Maensiri S., Phumying S., Sarmah A.K. Environmentally benign synthesis of phytochemicals-capped gold nanoparticles as nanopriming agent for promoting maize seed germination // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 573. P. 1089-1102.
23. Parveen A., Mazhari B.B.Z., Rao S. Impact of bio-nanogold on seed germination and seedling growth in *Pennisetum glaucum* // *Enzyme Microb. Technol.* 2016. V. 95. P. 107-111.
24. Rajeshwari A., Suresh S., Chandrasekaran N., Mukherjee A. Toxicity evaluation of gold nanoparticles using an *Allium cepa* bioassay // *RSC Adv.* 2016. V. 6. P. 24000-24009.
25. Sabo-Attwood T., Unrine J.M., Stone J.W., Murphy C.J., Ghoshroy S., Blom D., Bertsch P.M., Newman L.A. Uptake, distribution and toxicity of gold nanoparticles in tobacco (*Nicotiana xanthi*) seedlings // *Nanotoxicology.* 2012. V. 6. P. 353-360.

References

1. Bakaldina N.B., Alekseenko Zh.V., Plotnikov V.K. Holodoinducirovannye izmeneniya stabil'nosti mRNK sub#edinicy al'fa faktora jelongacii transljaciji 1 u prorostkov pshenicy i jachmenja // *Fiziologija rastenij.* 2001. T. 48. S. 879-885.
2. Bogatyrev V.A., Dykman L.A., Krasnov Ja.M., Plotnikov V.K., Hlebcov N.G. Metod differencial'noj spektroskopii rassejannogo sveta dlja issledovanija biospecificheskih reakcij v sistemah kon#jugatov zolotyh nanochastic s belkami ili oligonukleotidami // *Kolloidnyj zhurnal.* 2002. T. 64. S. 745-755.
3. Bogatyrev V.A., Dykman L.A., Hlebcov B.N., Plotnikov V.K., Hlebcov N.G. Opticheskie svojstva kon#jugatov kolloidnogo zolota s oligotimidinom i ih izmenenie pri reakcii gibridizacii s poliadenilovoj kislotoj // *Kolloidnyj zhurnal.* 2005. T. 67. S. 458-468.
4. Dykman L.A., Bogatyrjov V.A., Sokolov O.I., Plotnikov V.K., Repko N.V., Salfetnikov A.A. Vzaimodejstvie nanochastic zolota, serebra i magnija s rastitel'nymi ob#ektami // *Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2016. № 120. S. 675-705.
5. Dykman L.A., Shhjogolev V.A., Bogatyrjov S.Ju., Hlebcov N.G. Zolotye nanochasticy: sintez, svojstva, biomedicinskoe primenenie. - M.: Nauka, 2008. 316 s.
6. Evdokimov Ju.M., Skuridin S.G., Saljanov V.I., Popenko V.I., Shtykova Je.V., Hlebcov N.G., Shafeev G.A., Kac E.I. Nanochasticy zolota vlijajut na «uznavanie» dvuhcepochechnyh molekul DNK i zapreshhajut formirovanie ih holestericheskoy struktury // *Zhidkie kristally i ih prakticheskoe ispol'zovanie.* 2014. T. 14. S. 5-21.
7. Nasonov A.I., Evtushenko Ja.Ju., Serkin N.V., Plotnikov V.K. Osobennosti sostava zerna srednemorozoustojchivyh sortov jachmenja // *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2012. T. 1. S. 104-106.
8. Plotnikov V.K. *Biologija RNK zernovyh kul'tur.* - Krasnodar: Jedvi, 2009. 375 s.

9. Plotnikov V.K., Repko N.V., Salfetnikov A.A. Ciklichnost' vlijaniya atinomicina D na rost koleoptilej jachmenja // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 107. S. 1352-1371.

10. Plotnikov V.K., Smirnova E.V., Repko N.V., Salfetnikov A.A. Sortospecificchnost' dejstvija trilona B na prorastaniya semjan ozimogo jachmenja // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2016. № 120. S. 706-729.

11. Arora S., Sharma P., Kumar S., Nayan R., Khanna P.K., Zaidi M.G.H. Gold nanoparticle induced enhancement in growth and seed yield of *Brassica juncea* // Plant Growth Regul. 2012. V. 66. P. 303-310.

12. Dykman L.A., Khlebtsov N.G. Gold nanoparticles in biomedical applications: recent advances and perspectives // Chem. Soc. Rev. 2012. V. 41. P. 2256-2282.

13. Falco W.F., Botero E.R., Falcao E.A., Santiago E.F., Bagnato V.S., Caires A.R.L. *In vitro* observation of chlorophyll fluorescence quenching induced by gold nanoparticles // J. Photochem. Photobiol. A. 2011. V. 225. P. 65-71.

14. Feichtmeier N.S., Walther P., Leopold K. Uptake, effects, and regeneration of barley plants exposed to gold nanoparticles // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2015. V. 22. P. 8549-8558.

15. Fialcowitz E.J., Brewer B.Y., Keenan B.P., Wilson G.M. A hairpin-like structure within an AU-rich mRNA-destabilizing element regulates trans-factor binding selectivity and mRNA decay kinetics // J. Biol. Chem. 2005. V. 280. P. 22406-22417.

16. Frens G. Controlled nucleation for the regulation of the particle size in monodisperse gold suspensions // Nature Phys. Sci. 1973. V. 241. P. 20-22.

17. Hawthorne J., Musante C., Sinha S.K., White J.C. Accumulation and phytotoxicity of engineered nanoparticles to *Cucurbita pepo* // Int. J. Phytorem. 2012. V. 14. P. 429-442.

18. Judy J.D., Unrine J.M., Bertsch A.M. Evidence for biomagnification of gold nanoparticles within a terrestrial food chain // Environ. Sci. Technol. 2011. V. 45. P. 776-781.

19. Khlebtsov N.G., Dykman L.A. Biodistribution and toxicity of engineered gold nanoparticles: A review of *in vitro* and *in vivo* studies // Chem. Soc. Rev. 2011. V. 40. P. 1647-1671.

20. Nanotechnology and Plant Sciences. Nanoparticles and their Impact on Plants // Eds. Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H., Mohammad F. - N.-Y.: Springer. 2015. 305 p.

21. Navarro E., Baun A., Behra R., Hartmann N.B., Filser J., Miao A.-J., Quigg A., Santschi P.H., Sigg L. Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi // Ecotoxicology. 2008. V. 17. P. 372-386.

22. Mahakham W., Theerakulpisut P., Maensiri S., Phumying S., Sarmah A.K. Environmentally benign synthesis of phytochemicals-capped gold nanoparticles as nanopriming agent for promoting maize seed germination // Sci. Total Environ. 2016. V. 573. P. 1089-1102.

23. Parveen A., Mazhari B.B.Z., Rao S. Impact of bio-nanogold on seed germination and seedling growth in *Pennisetum glaucum* // Enzyme Microb. Technol. 2016. V. 95. P. 107-111.

24. Rajeshwari A., Suresh S., Chandrasekaran N., Mukherjee A. Toxicity evaluation of gold nanoparticles using an *Allium cepa* bioassay // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 24000-24009.

25. Sabo-Attwood T., Unrine J.M., Stone J.W., Murphy C.J., Ghoshroy S., Blom D., Bertsch P.M., Newman L.A. Uptake, distribution and toxicity of gold nanoparticles in tobacco (*Nicotiana xanthi*) seedlings // Nanotoxicology. 2012. V. 6. P. 353-360.