

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

# ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

## БИОЛОГИЯ

**Tomsk State University Journal of Biology**

---

---

*Научный журнал*

---

---

2011

№ 1 (13)

Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС 77-29499  
от 27 сентября 2007 г.

Журнал «Вестник Томского государственного университета. Биология»  
входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов  
и изданий, в которых должны быть опубликованы  
основные научные результаты диссертаций  
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»  
Высшей аттестационной комиссии



ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

## НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Майер Г.В.**, д-р физ.-мат. наук, проф. (председатель); **Дунаевский Г.Е.**, д-р техн. наук, проф. (зам. председателя); **Ревушкин А.С.**, д-р биол. наук, проф. (зам. председателя); **Катунин Д.А.**, канд. филол. наук, доц. (отв. секр.); **Аванесов С.С.**, д-р филос. наук, проф.; **Берцун В.Н.**, канд. физ.-мат. наук, доц.; **Гага В.А.**, д-р экон. наук, проф.; **Галажинский Э.В.**, д-р психол. наук, проф.; **Глазунов А.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Голиков В.И.**, канд. ист. наук, доц.; **Горцев А.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Гураль С.К.**, канд. филол. наук, проф.; **Демешкина Т.А.**, д-р филол. наук, проф.; **Демин В.В.**, канд. физ.-мат. наук, доц.; **Ершов Ю.М.**, канд. филол. наук, доц.; **Зиновьев В.П.**, д-р ист. наук, проф.; **Канов В.И.**, д-р экон. наук, проф.; **Кривова Н.А.**, д-р биол. наук, проф.; **Кузнецов В.М.**, канд. физ.-мат. наук, доц.; **Кулижский С.П.**, д-р биол. наук, проф.; **Парначев В.П.**, д-р геол.-минер. наук, проф.; **Петров Ю.В.**, д-р филос. наук, проф.; **Портнова Т.С.**, канд. физ.-мат. наук, доц., директор Издательства научно-технической литературы; **Потекаев А.И.**, д-р физ.-мат. наук, проф.; **Прокументов Л.М.**, д-р юрид. наук, проф.; **Прокументова Г.Н.**, д-р пед. наук, проф.; **Савицкий В.К.**, зав. редакционно-издательским отделом; **Сахарова З.Е.**, канд. экон. наук, доц.; **Слижов Ю.Г.**, канд. хим. наук, доц.; **Сумарокова В.С.**, директор Издательства ТГУ; **Сущенко С.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Тарасенко Ф.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Татьянин Г.М.**, канд. геол.-минерал. наук, доц.; **Унгер Ф.Г.**, д-р хим. наук, проф.; **Уткин В.А.**, д-р юрид. наук, проф.; **Шилько В.Г.**, д-р пед. наук, проф.; **Шрагер Э.Р.**, д-р техн. наук, проф.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА. БИОЛОГИЯ»

**Кулижский С.П.**, д-р биол. наук, проф., зав. каф. почвоведения и экологии почв, директор Биологического института (председатель); **Асгафурова Т.П.**, д-р биол. наук, проф., зав. каф. агрономии, директор Сибирского ботанического сада ТГУ (зам. председателя); **Гуреева И.И.**, д-р биол. наук, проф., зав. Гербарием П.Н. Крылова (зам. председателя); **Москвитина Н.С.**, д-р биол. наук, проф., зав. каф. зоологии позвоночных и экологии (зам. председателя); **Акимова Е.Е.**, канд. биол. наук, м.н.с. ОСП «НИИ ББ ТомГУ» (отв. секретарь); **Кривова Н.А.**, д-р биол. наук, проф., директор ОСП «НИИ ББ ТомГУ»; **Бушов Ю.В.**, д-р биол. наук, проф., зав. каф. физиологии человека и животных; **Данченко А.М.**, д-р биол. наук, проф., зав. каф. лесоведения и зеленого строительства; **Карначук Р.А.**, д-р биол. наук, проф., зав. каф. физиологии и биотехнологии растений; **Пяк А.И.**, д-р биол. наук, проф. каф. ботаники; **Свиридова Т.П.**, канд. биол. наук, зам. директора Сибирского ботанического сада ТГУ; **Стегний В.Н.**, д-р биол. наук, проф., зав. каф. цитологии и генетики.

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 574.5:581.132

Т.П. Астафурова<sup>1,3</sup>, Ю.Н. Моргалёв<sup>2</sup>, А.П. Зотикова<sup>3-4</sup>, Г.С. Верхотурова<sup>1</sup>,  
С.И. Михайлова<sup>3</sup>, А.А. Буренина<sup>1,3</sup>, Т.А. Зайцева<sup>1</sup>, В.М. Постовалова<sup>1</sup>,  
Л.К. Цыцарева<sup>1</sup>, Г.В. Боровикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Обособленное структурное подразделение «Научно-исследовательский институт биологии и биофизики Томского государственного университета» (г. Томск)

<sup>2</sup> Центр «Биотест-Нано» Томского государственного университета (г. Томск)

<sup>3</sup> Биологический институт Томского государственного университета (г. Томск)

<sup>4</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск)

### ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ТИТАНА И ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАСТЕНИЙ

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Разработка методологии биотестирования и создание средств обнаружения наночастиц в окружающей среде для оценки их безопасности, распространения и воздействия» (ГК от 11.09.2008 г. № 01.678.11.3005).

*Изучено влияние водных суспензий наночастиц  $TiO_2$  (размером 5 нм) и  $Al_2O_3$  (размером 7 нм) в различных концентрациях на растения фасоли обыкновенной, пшеницы мягкой яровой, амаранта багрянец в различных концентрациях. Выявлено неоднозначное воздействие наночастиц на рост и развитие изученных растений, а также содержание хлорофиллов а, b и каротиноидов в листьях. Установлено, что наиболее устойчивой культурой к действию данных наночастиц является фасоль. Растения пшеницы характеризуются выраженной избирательной чувствительностью к исследованным наночастицам, что определяет специфику изменений физиологических показателей, в том числе повышение урожайности у растений после воздействия суспензией наночастиц  $TiO_2$ . Значительное повышение содержания амарантина, наблюдаемое при воздействии наночастиц  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$ , свидетельствует о высокой чувствительности амаранта и о специфической роли наночастиц в стимулировании биосинтеза амарантина.*

**Ключевые слова:** наночастицы диоксида титана и оксида алюминия; *Phaseolus vulgaris* L.; *Triticum aestivum* L.; *Amaranthus cruentus* L.; морфометрические показатели; фотосинтетические пигменты; амарантин.

В настоящее время в связи с развитием и внедрением нанотехнологий особую остроту приобретают проблемы, связанные с возможным воздействием техногенных наночастиц на жизнедеятельность живых организмов, в том числе растений. В первых экспериментальных исследованиях, связанных с биотестированием наночастиц, предпочтение растениям было отдано не случайно [1–3]. Растительные организмы являются разнообразными и доступными

объектами, использование которых в скрининг-исследованиях дает возможность оценить как специфичность воздействия наночастиц, так и их дозозависимые эффекты, т.е. чувствительность растений можно рассматривать как индикатор экотоксичности наноматериалов. Кроме того, растения представляют интерес для исследователя и как высокоинформативные экспериментальные модели, позволяющие проанализировать большие объемы биологического материала в течение вегетационного опыта в полевых условиях.

Имеющиеся доступные немногочисленные литературные сведения по биотестированию опасности наночастиц не дают четких представлений об их воздействии на растительный организм. Они либо крайне противоречивы относительно влияния наноматериалов на скорость прорастания семян, рост корней и надземной части растений, либо трудно сопоставимы как по дозам и размерности наночастиц, так и по видам растений [1–5] и ограничены в основном попытками оценить чувствительность растений по изменению морфологических показателей. Экспериментальных данных, связанных с изучением влияния наночастиц на биохимические и физиологические процессы в листьях растений, практически нет. Однако необходимость и важность таких исследований определяются тем, что именно растения являются основанием «пищевой пирамиды» на нашей планете, и сохранение оптимальной экологии полноценной «пищевой цепочки», включая человека, является актуальной задачей современной науки и природопользования [1–3].

Цель данного исследования заключалась в изучении действия наночастиц диоксида титана и оксида алюминия на морфологические параметры растений, содержание в листьях фотосинтетических пигментов и амарантина в лабораторно-полевом опыте.

### Материалы и методики исследования

Объектами исследования служили растения: фасоль обыкновенная, *Phaseolus vulgaris* L., сорт Бийчанка; пшеница мягкая яровая, *Triticum aestivum* L., сорт Новосибирская 29; амарант багрянец, *Amaranthus cruentus* L., сорт Чергинский. Семена растений высевали на опытные делянки в 3 повторностях. Перед посевом семена контрольных растений замачивали в дистиллированной воде: фасоли – в течение 2 сут, пшеницы и амаранта – в течение 1 сут. Семена опытных растений замачивали по аналогичной схеме в суспензиях наночастиц  $\text{TiO}_2$ , размером 5 нм, и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , размером 7 нм, в концентрациях 8,9 и 5,5 мг/л соответственно.

В течение вегетационного опыта растения дважды опрыскивали суспензиями этих частиц: в 18-дневном возрасте в концентрациях 8,7 мг/л ( $\text{TiO}_2$ ) и 7 мг/л ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), в 27-дневном – 9,5 и 3,5 мг/л соответственно. В эти же сроки контрольные растения опрыскивали водой. Различия в концентрациях получаемых дисперсных систем (ДС) следуют из принципа применения ДС, характерных для естественных условий. При создании ДС методом ультразвукового диспергирования с последующей выдержкой до стабилизации турбидности получают ДС с концентрациями 1–10 мг/л [6].

У 21-дневных контрольных и опытных растений измеряли высоту стебля: у пшеницы – в фазе кущения, у фасоли – в фазе первого настоящего листа и у амаранта – в фазе второго настоящего листа. В возрасте 30 дней у всех растений определяли содержание зеленых и желтых пигментов, а у амаранта, дополнительно, содержание амарантина. У пшеницы после созревания измеряли длину и массу колоса, количество и массу зерен в колосе и оценивали урожайность.

Для определения количества пигментов пробу свежего растительного материала фиксировали 96%-ным этиловым спиртом. Вытяжки разводили таким образом, чтобы величина оптической плотности конечного раствора не превышала 0,6 ед. Содержание пигментов определяли спектрофотометрически (Spectrophotometer UV-1601PC Shimadzu, Япония) по величине оптической плотности при 665, 649 и 440 нм с последующим расчетом концентрации по формулам Вернона [7]. Количество амарантина в листьях амаранта определяли по методике [8].

Характеристики наночастиц диоксида титана (метод электровзрыва) и оксида алюминия (плазмохимический метод) верифицировали с помощью электронной микроскопии в проходящем свете на микроскопе «JEM-100CX2», методом динамического светорассеяния (dynamic light scattering – DLS) с помощью анализатора размеров диспергированных частиц «Zetasizer Nano ZS», методом БЭТ (прибор TriStar 3000) для измерения удельной поверхности и методом рентгеноструктурного анализа фазового состава и структурных характеристик (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000) [9].

Данные, полученные в ходе экспериментов, обрабатывались с помощью пакета Statistica for Windows, версия 6.0.

### Результаты исследования и обсуждение

Как показали результаты измерений высоты у 21-дневных растений, замачивание семян и последующая однократная обработка растений суспензиями наночастиц оксидов титана и алюминия не оказали влияния на скорость роста растений фасоли и пшеницы на начальной стадии их развития по сравнению с контрольными растениями (табл. 1). У растений амаранта при воздействии суспензией наночастиц оксида алюминия наблюдалось замедление роста по сравнению не только с контрольными (на 20%), но и опытными растениями, обработанными наночастицами  $\text{TiO}_2$  (на 15%). Более высокая токсичность наночастиц алюминия, наблюдаемая у амаранта в данном эксперименте, подтверждается исследованиями, в которых установлен ряд токсичности наночастиц металлов, в том числе и алюминия [5, 10].

Физиологические возможности растений определяются как структурной, так и биохимической организацией пигментного аппарата. Известно, что хлорофиллы *a*, *b* и каротиноиды играют ключевую роль в фотосинтетических процессах, а изменение их концентрации и соотношения в пигментном комплексе является индикатором экологического неблагополучия [11]. Поэтому были проведены исследования, связанные с изучением влияния наночастиц диоксида титана и оксида алюминия на содержание пигментов в листьях растений.

Т а б л и ц а 1

**Высота 21-дневных растений после первого опрыскивания  
их суспензией наночастиц, см**

| Вариант опыта                  | Вид растений                        |                           |  |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--|
|                                | Фасоль<br>(фаза I настоящего листа) | Пшеница<br>(фаза кущения) | Амарант<br>(фаза двух настоящих листьев)       |
| Контроль                       | 10,6 ± 0,2                          | 30,6 ± 0,8                | 4,16 ± 0,2                                     |
| TiO <sub>2</sub>               | 10,9 ± 0,1                          | 31,5 ± 0,8                | 3,9 ± 0,2                                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10,5 ± 0,2                          | 30,2 ± 0,7                | 3,3 ± 0,2;<br>p < 0,001; p <sub>1</sub> < 0,05 |

*Примечание.* Здесь и далее p – статистически значимые различия контрольного и опытного вариантов; p<sub>1</sub> – статистически значимые различия между опытными группами растений.

У растений фасоли отсутствие изменений в содержании хлорофиллов под воздействием наночастиц диоксида титана сопровождалось достоверным, хотя и незначительным (всего на 6%), увеличением количества желтых пигментов. Однако обработка семян и вегетирующих растений суспензией наночастиц оксида алюминия не вызывала у фасоли отклонений в содержании хлорофиллов и каротиноидов от контрольных значений (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

**Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений фасоли, пшеницы  
и амаранта после комплексной обработки суспензиями наночастиц  
диоксида титана и оксида алюминия**

| Вид растения, сорт             | Вариант опыта                  | Пигменты, мкг/г сырой массы                           |  |  |
|--------------------------------|--------------------------------|---|--|--|
|                                |                                | Хлорофилл a   | Хлорофилл b  | Каротиноиды  |
| Фасоль, сорт Бийчанка          | Контроль                       | 1102,3 ± 15,40  | 330,9 ± 4,6  | 478,3 ± 6,3  |
|                                | TiO <sub>2</sub>               | 1139,8 ± 7,3  | 338,9 ± 3,5  | 508,3 ± 1,6<br>p < 0,01                            |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1134,5 ± 24,7   | 335,5 ± 5,2  | 490,1 ± 2,5  |
| Пшеница, сорт Новосибирская 29 | Контроль                       | 1578,2 ± 14,3   | 608,7 ± 13,9                                       | 508,3 ± 8,2  |
|                                | TiO <sub>2</sub>               | 1606,7 ± 6,6  | 561,9 ± 9,1  | 516,0 ± 3,5  |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1934,2 ± 18,3<br>p < 0,001;<br>p <sub>1</sub> < 0,001 | 670,4 ± 9,9<br>p < 0,01;<br>p <sub>1</sub> < 0,001 | 599,7 ± 7,4<br>p < 0,01;<br>p <sub>1</sub> < 0,001 |
| Амарант, сорт Чергинский       | Контроль                       | 1477,3 ± 19,8   | 343,6 ± 3,5  | 535,5 ± 4,2  |
|                                | TiO <sub>2</sub>               | 1346,2 ± 7,1<br>p < 0,001                             | 306,6 ± 4,4<br>p < 0,001                           | 562,7 ± 5,2<br>p < 0,001                           |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1405,9 ± 44,3   | 323,9 ± 15,6                                       | 551,0 ± 2,8<br>p < 0,01                            |

У растений пшеницы, обработанных суспензией наночастиц диоксида титана, содержание фотосинтетических пигментов не изменялось по сравнению с контрольным уровнем. Однако при воздействии наночастиц оксида алюминия наблюдалось одновременное увеличение содержания всех пигментов –

хлорофилла *a* на 20–22%, хлорофилла *b* и каротиноидов – на 15–16% (см. табл. 2).

Совершенно другая картина наблюдалась у растений амаранта – аналогичное воздействие суспензией наночастиц диоксида титана вызывало, наоборот, снижение содержания зеленых пигментов на 9–10% и незначительное, но достоверное повышение уровня каротиноидов. При воздействии суспензией наночастиц алюминия изменений в содержании зеленых пигментов амаранта не обнаружено, за исключением небольшого увеличения содержания каротиноидов (табл. 2). Интересно, что наиболее значительные изменения наблюдались в содержании амарантина, увеличение которого составило 65% при воздействии наночастиц  $\text{TiO}_2$  и 47% – наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (табл. 3).

Таблица 3

**Содержание амарантина в листьях амаранта после комплексной обработки суспензиями наночастиц оксидов титана и алюминия**

| Вариант опыта           | Амарантин, мкмоль/г сырой массы | %   |
|-------------------------|---------------------------------|-----|
| Контроль                | $309,4 \pm 14,8$                | 100 |
| $\text{TiO}_2$          | $509,9 \pm 34,8$<br>$p < 0,001$ | 165 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $454,4 \pm 26,2$<br>$p < 0,001$ | 147 |

Как уже отмечалось выше, у растений амаранта  $\text{TiO}_2$ -группы наблюдалось снижение содержания хлорофиллов *a* и *b* (см. табл. 2). Известно, что небольшое снижение концентрации зеленых пигментов не является фактором, лимитирующим фотосинтез, однако синтез хлорофиллов очень чувствителен к различным воздействиям (как внешним, так и внутренним), нарушающим метаболические процессы в клетке. В данном случае снижение содержания хлорофиллов сопровождается одновременным повышением концентрации каротиноидов и амарантина. Увеличение синтеза каротиноидов, выполняющих как фотосинтетическую, так и антиоксидантную функции в листьях [12, 13], свидетельствует и о некоторой компенсации светособирающей емкости зеленых пигментов, и о необходимой активации защитной роли каротиноидов при обработке растений наночастицами.

Амарантин относится к биологически активным веществам, физиологические свойства которого в последние годы вызывают повышенный интерес. Он принимает участие в светозависимых окислительно-восстановительных реакциях, происходящих в хлоропластах, в клеточных метаболических процессах, а также в регуляции светозащитной и антиоксидантной функций, однако его физиологическое действие неоднозначно и зависит от его концентрации в клетке [14–16].

Возможно, изменения в метаболическом гомеостазе растений амаранта  $\text{TiO}_2$ -группы, происходящие в условиях достаточно высоких концентраций амарантина (табл. 3), приводят к снижению синтеза хлорофиллов. В связи с этим возникает вопрос: не превышает ли эндогенный пул амарантина у опытных растений тот критический его уровень, за которым следует подав-

ление путей переноса электрона в хлоропластах в энергетических процессах (реакции Хилла и Меллера) и, следовательно, фотосинтетической активности в целом? Подтверждением этого предположения является установленный факт дозозависимого эффекта экзогенного амарантина на ростовые процессы растений, малые дозы которого вызывают стимулирующий эффект, а большие – ингибирующий [15, 16]. Об этом, скорее всего, свидетельствуют данные, полученные нами в исследованиях воздействия на растения амаранта наночастиц алюминия. В этих условиях повышение концентрации амарантина, хотя и достигает 47% по сравнению с контрольным значением, не сопровождается снижением содержания зеленых пигментов.

Оценивая полученные данные с позиций чувствительности пигментов растений к данному фактору, можно сказать, что все исследованные культуры являются в большей или меньшей степени чувствительными к воздействию наночастиц. Наиболее стабильным фотосинтетическим аппаратом обладает фасоль, устойчивость которой проявилась к действию как наночастиц диоксида титана (за исключением каротиноидов), так и наночастиц оксида алюминия. Несмотря на то что при обработке растений пшеницы суспензией наночастиц алюминия на ранних стадиях развития наблюдался самый яркий эффект адаптивного ответа фотосинтетических пигментов, увеличение емкости пигментного комплекса (см. табл. 2) не приводило к повышению урожайности, хотя и не снижало её по сравнению с контролем (табл. 4). Тем не менее растения пшеницы, устойчивые к воздействию наночастиц диоксида титана в начальные стадии онтогенеза, завершают свой цикл увеличением массы зерна, количества зёрен в колосе, его длины и, в итоге, повышением урожайности на 15,3% (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

**Структура урожая пшеницы после комплексной обработки суспензией наночастиц диоксида титана и оксида алюминия**

| Вариант опыта                  | Морфометрические показатели зерна |                 |                                |                         | Урожайность зерна с 1 м <sup>2</sup> , г |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------|--|
|                                | Длина колоса, см                  | Масса колоса, г | Количество зерен в колосе, шт. | Масса зерна в колосе, г |  |
| Контроль                       | 8,6±0,1                           | 1,5 ± 0,4       | 26,5± 0,5                      | 1,1 ± 0,04              | 373,8 ±3,7                               |
| TiO <sub>2</sub>               | 9,5 ± 0,1<br>p<0,001              | 1,6 ± 0,03      | 29,4 ± 0,5<br>p<0,001          | 1,2 ± 0,02<br>p<0,001   | 431,0 ± 11,1<br>p<0,001                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8,4 ± 0,1                         | 1,4 ± 0,03      | 25,1± 0,6                      | 1,0 ± 0,03<br>p<0,001   | 387,6 ± 16,3                             |

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что предпосевная обработка семян, а затем и опрыскивание вегетирующих растений факоли, пшеницы и амаранта суспензиями наночастиц оксидов титана и алюминия вызывают не только неоднозначные изменения морфофизиологических параметров, но и выявляют разную чувствительность этих культур к данным видам наночастиц.

В настоящее время идет стремительное накопление экспериментального материала, который свидетельствует о том, насколько уникальны и разнообразны



разны по своим проявлениям наночастицы, даже если они состоят из одного и того же химического вещества. Их свойства зависят не только от физической природы, способа получения, размеров, структуры наночастиц, но и от биологической модели, на которой проводятся испытания [17–19]. Как показали результаты проведенных исследований, из всех использованных нами растений наиболее устойчивой к воздействию наночастиц, как по морфологическим, так и по физиологическим показателям, оказалась фасоль. Это соответствует литературным данным о том, что некоторые растения (тыква, лимская фасоль) обладают способностью отфильтровывать наночастицы, избегая их воздействий, в отличие от других культур (капуста, морковь, пшеница, огурец, соя), которые их аккумулируют [1, 3].

Среди перечисленных выше культур, способных аккумулировать наночастицы, находится пшеница, чувствительность которой к наночастицам оксидов титана и алюминия подтверждается экспериментальными данными (см. табл. 1, 2, 4). Проростки растений пшеницы, не отличаясь по скорости роста от контрольных образцов, проявляли избирательную чувствительность к воздействию наночастиц титана и алюминия. Это определило специфику изменений их морфофизиологических параметров: стабильность функционирования фотосинтетических пигментов, повышение урожайности, улучшение структуры урожая у растений  $TiO_2$ -группы и, наоборот, увеличение фотосинтетической активности у растений  $Al_2O_3$ -группы, которое не сопровождалось изменением урожайности.

Особый интерес вызывает амарантин – биологически активное вещество, выделенное из листьев амаранта. Проведенные исследования показали, что наночастицы оксидов титана и алюминия значительно повышают его содержание, особенно при обработке наночастицами диоксида титана. Снижение содержания зеленых пигментов, наблюдаемое только при воздействии суспензии наночастиц  $TiO_2$ , по-видимому, носит вторичный характер и может быть обусловлено прямым ингибирующим влиянием повышенных концентраций амарантина [12, 14]. Тот факт, что оба вида наночастиц значительно повышают уровень амарантина в клетке, свидетельствует не только о чувствительности растений амаранта к присутствию наночастиц, но и о специфической роли наночастиц в стимулировании биосинтеза данного соединения.

Если сравнивать наночастицы диоксида титана и оксида алюминия по значимости их воздействия на исследуемые культуры, то они в равной степени неэффективны на растениях фасоли, а у пшеницы и амаранта наночастицы диоксида титана вызывают более заметные, хотя и разнонаправленные, изменения, чем наночастицы оксида алюминия. Каков механизм действия наночастиц на клеточные структуры и их функции, что лежит в основе чувствительности растений, проявляющейся в их способности отфильтровывать или аккумулировать наночастицы? В настоящее время установлено, что растения для своего роста и развития могут использовать поверхностную энергию поступающих извне наночастиц, в том числе и полученную семенами во время предпосевной обработки [20], а наночастицы – оказывать пролонгирующее действие, которое связано с концентрированием ионов металла вокруг молекул в клетке [21]. Таким образом, используемый в условиях лабораторно-

полевого опыта агротехнический прием (замачивание семян и последующее опрыскивание растений), по-видимому, способствует как усилению, так и увеличению длительности воздействия наночастиц оксидов титана и алюминия и проявляется в зависимости от чувствительности культуры растений (пшеница, амарант), а также физико-химических особенностей наночастиц исследуемых оксидов металлов.

### Литература

1. Ling Y., Yatts D. Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles // *Toxicology Letters*. 2005. Vol. 158. P. 122–132.
2. Zhu H., Han J., Xiao J.Q., Jin Y. Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants // *Journal Environment Monitoring*. 2008. № 10. P. 713–717.
3. Ling Y., Yatts D. Растения способны накапливать наночастицы в тканях. URL: [http://pronano.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=186&Itemid=2](http://pronano.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=186&Itemid=2), свободный.
4. Yatts D., Ling Y. Nanoparticles could have a negative effect on plant growth // *Nanotechnology News*. 2007. № 3. P. 86–92.
5. Райкова А.П., Паничкин Л.А., Райкова Н.Н. Исследование влияния ультрадисперсных порошков металлов, полученных различными способами, на рост и развитие растений // *Материалы Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии и информационные технологии – технологии XXI века»*. М., 2006. С. 108–111.
6. Morgalev Yu.N., Khotch N.S., Morgaleva T.G. et al. Biotesting Nanomaterials: Transmissibility of Nanoparticles into a Food Chain // *Nanotechnologies in Russia*. 2010. Vol. 5, № 11–12. P. 851–856.
7. Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // *Биохимические методы в физиологии растений* / Под ред. О.А. Павлиновой. М.: Наука, 1971. С. 154–170.
8. Гинс М.С., Кононков П.Ф., Гинс В.К. и др. Физиологические свойства и биологическая активность амарантина из растений амаранта *Amaranthus Tricolor L.* // *Прикладная биохимия и микробиология*. 1998. Т. 34. С. 450–454.
9. Моргалёв Ю.Н., Хоч Н.С., Моргалёва Т.Г. и др. Биотестирование наноматериалов: о возможности транслокации наночастиц в пищевые сети // *Российские нанотехнологии*. 2010. Т. 5, № 11–12. С. 131–135.
10. Глуценко Н.Н., Богословская О.А., Ольховская И.П. Сравнительная токсичность солей и наночастиц металлов и особенность их биологического действия // *Материалы Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии и информационные технологии – технологии XXI века»*. М., 2006. С. 93–95.
11. Зотикова А.П., Бендер О.Г., Рудник Т.И. Экофизиологические реакции листового аппарата кедр сибирского на изменение климата // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. Т. 19, № 11. С. 969–972.
12. Ладыгин В.Г., Ширишкова Г.Н. Современные представления о функциональной роли каротиноидов в хлоропластах эукариот // *Общая биология*. 2006. Т. 67, № 3. С. 163–189.
13. Капитанов А.Б., Пименов А.М. Каротиноиды как антиоксидантные модуляторы клеточного метаболизма // *Успехи современной биологии*. 1996. Т. 116, вып. 2. С. 169–173.
14. Гинс М.С. Биологически активные вещества амаранта. Амарантин: свойства, механизм действия и практическое использование. М.: Изд-во РУДН, 2002. 183 с.
15. Птушенко В.В., Гинс М.С., Гинс В.К., Тихонов А.Н. Взаимодействие амарантина с электрон-транспортной цепью хлоропластов // *Физиология растений*. 2002. № 5. С. 656–662.

16. Кононков П.Ф., Гинс В.К., Гинс М.С. Амарант – перспективная культура XXI века. М.: Изд. дом Евгения Федорова, 1997. 170 с.
17. Jiang J., Oberdrster G., Elder A. et al. Does nanoparticle activity depend upon size and crystal phase? // *Nanotoxicology*. 2008. Vol. 2, iss. 1. P. 33–42.
18. Adili A., Crowe S., Beaux M.F. et al. Differential cytotoxicity exhibited by silica nanowires and nanoparticles // *Nanotoxicology*. 2008. Vol. 2, iss. 1. P. 1–8.
19. Schrandt A.M., Daia L., Schlager J.J. et al. Differential biocompatibility of carbon nanotubes and nanodiamonds // *Diamond and Related Materials*. 2007. Vol. 16, iss. 12. P. 2118–2123.
20. Егоров Н.И., Шафронов О.Д., Егоров Д.Н., Сулейманов Е.В. Разработка и проведение экспериментальной оценки эффективности применения в растениеводстве новых видов удобрений, полученных с использованием нанотехнологий // *Вестник Нижегородского университета*. 2008. № 6. С. 94–99.
21. Коваленко Л.В., Фолманис Г.Э. Биологически активные нанопорошки железа. М.: Наука, 2006. 124 с.

Поступила в редакцию 21.06.2010 г.

Tatiana P. Astafurova<sup>1,3</sup>, Yuri N. Morgalev<sup>2</sup>, Albina P. Zotikova<sup>3,4</sup>, Galina S. Verkhoturova<sup>1</sup>, Svetlana I. Mikhailova<sup>3</sup>, Anastasia A. Burenina<sup>1,3</sup>, Tamara A. Zaitseva<sup>1</sup>, Valentina M. Postovalova<sup>1</sup>, Ludmila K. Tsytseva<sup>1</sup>, Galina V. Borovikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Biology and Biophysics of Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Biotest Nano Center of Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Biological Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>4</sup>Institute of Climatic and Ecological Systems Monitoring of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

## EFFECT OF NANOPARTICLES OF TITANIUM DIOXIDE AND ALUMINUM OXIDE ON SOME MORPHOPHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PLANTS

*The article is devoted to studying the effect of nanoparticles of titanium dioxide TiO<sub>2</sub> and aluminum oxide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on morphometric parameters of plant beans, wheat and amaranth, the content of chlorophylls a, b and carotenoids, as well as amaranthine in a laboratory-field experiment. Before sowing the seeds of control plants were soaked in distilled water: beans – for two days, wheat, and amaranth – within one day. Seeds of test plants were soaked in a similar way in aqueous suspensions of nanoparticles of TiO<sub>2</sub>, the size of 5 nm, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the size of 7 nm, in concentrations, respectively, 8,9 mg/l and 5,5 mg/l. During the experiment, the developing plants were sprayed twice: in the 18-day-old suspension of nanoparticles with a concentration of 8,7 mg/l of TiO<sub>2</sub> and 7 mg/l of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and in the 27-day one – with the concentration of nanoparticles of 9,5 mg/l and 3,5 mg/l, respectively. In the same period, control plants were sprayed with water.*

*In 21-day-old control and experimental plants the height of the stem was measured: in wheat tillering stage, the beans in a phase of the first true leaf and amaranth in the second phase of this sheet. At the age of 30 days in all plants the content of green and yellow pigments was determined, and in amaranth, additionally, the amaranthine content. In wheat, after maturation the length and the weight of the spike and the number and the weight of grains in the ear were measured, and the yield was estimated. The ambiguity of the impact of nanoparticles of TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the growth parameters, chlorophyll content a, b and carotenoids in these culture was revealed. It was found that a string bean is the most resistant to the action of these nanoparticles on morphological and physiological parameters. Seedlings of wheat plants under examination, not differing in growth rate from the control samples, demonstrated selective sensitivity to the effects*

of nanoparticles of titanium and aluminum. It identified specific changes in their morphophysiological parameters: the stability of the photosynthetic pigments, increasing productivity, improving the structure of crop plants in  $TiO_2$ -group, and, conversely, a significant increase in photosynthetic activity in plants in  $Al_2O_3$ -group, which was not accompanied by changes in crop yields.

Growth inhibition of amaranth plants and the subsequent significant increase in the content of amaranthine observed under the influence of nanoparticles show a high sensitivity of amaranth and their specific role in stimulating the biosynthesis amaranthine.

It was established that these nanoparticles, considering the importance of their impact on the studied cultures, are equally ineffective on plants beans. In wheat and amaranth nanoparticles of titanium dioxide cause more noticeable, although with different directions, changes than nanoparticles of aluminum oxide.

**Key words:** nanoparticles of titanium dioxide and aluminum oxide; plants scorn (*Phaseolus vulgaris* L.); bean (*Triticum aestivum* L.); amaranth (*Amaranthus cruentus* L.); morphometric parameters; photosynthetic pigments; amaranthine.

Received June 21, 2010