

УДК 581.1:546.62

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-1-179-188

РЕАКЦИЯ ОВСА ПОСЕВНОГО НА ПРИСУТСТВИЕ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В ПИТАТЕЛЬНОМ СУБСТРАТЕ

Сытников Д. М.¹, Мусса А.², Губарев Ф. А.¹

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

²Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: sytnikov@list.ru

В условиях вегетационного опыта изучена реакция овса посевного (*Avena sativa* L.) на присутствие в субстрате выращивания растений наночастиц алюминия. Показано, что под действием наночастиц у овса изменяется содержание фотосинтетических пигментов в листьях, указывающее на перестройку адаптационных механизмов растения. При прохождении основных фаз развития, у овса, выращенного в присутствии возрастающих доз наночастиц (10, 100 и 1000 мг/кг), в листьях и корнях растений отмечается снижение активности каталазы и повышение активности пероксидазы, обусловленные реакцией растительного организма на стресс. Установлено, что содержание в субстрате выращивания овса посевного наночастиц в концентрации 1000 мг/кг приводит к снижению массы корней в фазу кущения, а также надземной массы растений в фазах кущения, колошения и молочной спелости. При этом высота растений, длина соцветий, количество и масса зёрен также снижаются, что свидетельствует об отрицательном воздействии высоких концентраций наночастиц алюминия на продукционный процесс.

Ключевые слова: *Avena sativa* L., наночастицы алюминия, фотосинтетические пигменты, антиоксидантные ферменты, структура урожая, продуктивность растений.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, посвящённые вопросам взаимодействия растений с наночастицами, ведутся в течение последних двух десятилетий. Их появление во многом связано с возрастающим интересом к нанотехнологиям и возможными нежелательными экологическими эффектами от поступления наночастиц в окружающую среду [1]. За указанный период опубликован ряд работ о влиянии наночастиц, в том числе металлов, на растительный организм, при этом отличительной особенностью таких сообщений остаётся их противоречивость. По-прежнему нерешёнными остаются и вопросы, связанные с обеспечением биобезопасности.

Химическая природа, размер, форма, поверхностный заряд и концентрация относятся к основным факторам, обуславливающим процессы внутриклеточного проникновения наночастиц [2]. Следует отметить, что токсичность ионов металлов превосходит таковую у наночастиц. В свою очередь воздействие наночастиц металлов и их оксидов на биологические системы отличается от влияния частиц ещё больших размеров [3].

Предполагается возможное отрицательное воздействие наночастиц металлов на окружающую среду, в то же время механизмы таких эффектов и их долгосрочные последствия для живых организмов изучены мало. При этом одним из самых востребованных металлов в хозяйственной деятельности человека является алюминий, он широко используется в качестве компонента высокоэнергетических материалов в виде нанопорошков.

Алюминий не является тяжёлым металлом и широко распространён в земной коре, его физиологические функции в растительном организме до конца неясны [4]. Современные методы [5] позволяют определять локализацию металлов в органах, а также идентифицировать наночастицы на субклеточном уровне и определять их цитотоксичность. Недостаточно изученной остаётся направленность влияния различных концентраций наночастиц, в том числе алюминия [6–8], на рост и развитие растений, механизмы их морфологических, клеточных и молекулярных изменений. Цель настоящей работы – изучить физиолого-биохимические особенности развития овса посевного (*Avena sativa* L.), испытывающего присутствие различных концентраций наночастиц алюминия в субстрате выращивания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служили растения овса посевного (*Avena sativa* L.) сорта Скакун, который отличается устойчивостью к засухе, полеганию, осыпанию зерна, а также к поражению корончатой ржавчиной и пыльной головнёй. Овёс посевной, имеет высокую отзывчивость к токсикантам и используется для проведения фитотестирования, поскольку даёт наиболее стабильные и воспроизводимые результаты по сравнению с другими культурами. Кроме того, овёс официально рекомендован в качестве тест-культуры для определения токсичности техногенно загрязнённых почв [9]. В работе также использовали нанопорошок алюминия (наночастицы), полученный методом электрического взрыва проводника, с распределением частиц по размерам, близким к нормальному логарифмическому с максимумом 100 нм.

Вегетационные исследования проводили в условиях модельных опытов на фитотроне при влажности субстрата 60 % и освещённости не менее 20 тыс. люкс (lx) при температуре воздуха 22–24 °С и относительной влажности в пределах 70 %. На питательный субстрат в 7-килограммовых сосудах Вагнера высевали по 30 семян и после прорывки выращивали по 15 растений. В качестве субстрата использовали промытый речной песок с внесением минеральной питательной смеси по Гельригелю, содержащей полную норму азота (1 норма соответствует 708 мг $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4 \text{H}_2\text{O}$ на 1 кг песка) и микроэлементы. В песчаный субстрат также вносили наночастицы алюминия в концентрациях 10, 100 и 1000 мг/кг. Контролем служили растения, выращенные на субстрате без использования наночастиц. Повторность опыта четырёхкратная. Биометрические показатели и массу сырого вещества корней и надземной части растений определяли в десятикратной повторности.

Растения для определения физиолого-биохимических показателей и учёта продуктивности отбирали в фазах 2-х листьев, кущения, колошения, молочной и полной спелости. Для измерений были взяты пробы корней, а также листьев без видимых признаков старения, которые отбирали из средних ярусов трёх-четырёх рандомизированных растений одного варианта.

Определение содержания фотосинтетических пигментов производили по методике Веллбурна [10]. Хлорофиллы и каротиноиды экстрагировали диметилсульфоксидом (на 0,1 г растительного материала 10 мл ДМСО) из высечек листьев, после чего измеряли оптическую плотность раствора на фотоэлектроколориметре (Фотометр КФК-3-01; АО «ЗОМЗ», Россия) при 480, 649 и 665 нм в кювете толщиной 1 см.

Активность антиоксидантных ферментов определяли в растительном материале, который растирали, растворяли в дистиллированной воде и отфильтровывали. Пероксидазную активность определяли методом [11], основанным на измерении времени, за которое опытный раствор достигает необходимой оптической плотности (Фотометр КФК-3-01). В качестве субстрата использовали бензидин, в результате окисления которого образуется соединение синего цвета. Активность пероксидазы (КФ 1.11.1.7) выражали в единицах оптической плотности на грамм сырой массы растительного материала в секунду ($\Delta D_{670} \text{ г}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$). Активность каталазы (КФ 1.11.1.6) определяли газометрическим методом [11] по объёму выделенного кислорода и выражали в $\text{мл O}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$.

Статистическую обработку полученных данных производили по Доспехову [12]. В таблицах и в тексте представлены средние арифметические и стандартные ошибки. Достоверность разницы значений «*» оценивали путём определения существенности различий между выборками по НСР, используя 5 % уровень значимости ($P \leq 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе вегетационного опыта изучали влияние различных концентраций наночастиц алюминия (10, 100 и 1000 мг/кг) в среде выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.). Из данных таблицы 1 следует, что достоверные изменения в накоплении растениями вегетативной массы отмечались в онтогенезе только при использовании максимальных концентраций наночастиц алюминия. Так, содержание в субстрате 1000 мг/кг наночастиц приводило к снижению массы корней в фазу кущения, а также надземной массы растений в фазах кущения, колошения и молочной спелости.

Известно, что различные токсиканты могут изменять нормальное протекание физиолого-биохимических процессов у растений, включая фотосинтез. Содержание фотосинтетических пигментов часто используют в качестве индикатора воздействия загрязняющих веществ. Качественный и количественный состав пигментного комплекса растений рассматривают в качестве показателя их приспособленности к условиям окружающей среды. Результаты опыта показали (табл. 2), что внесение наночастиц алюминия в субстрат выращивания овса посевного в концентрациях 100 и 1000 мг/кг может приводить к снижению содержания хлорофиллов *a* и *b* в листьях

на ранних фазах развития растений. При этом в фазу колошения и молочной спелости было отмечено достоверное увеличение количества как хлорофиллов *a* и *b*, так и каротиноидов, в вариантах с использованием наночастиц алюминия в концентрации 100 мг/кг. Поскольку реакция растений на стресс имеет многофазный характер [13], фаза нарушения гомеостаза и снижения содержания пигментов фотосинтеза иногда может сменяться так называемой парадоксальной фазой, в которой включаются свои адаптационные механизмы, и количество пигментов при этом возрастает.

Таблица 1

Динамика формирования вегетативной массы (г/растение) овса посевного (*Avena sativa* L.) на субстрате, содержащем различные концентрации наночастиц алюминия

Концентрация наночастиц, мг/кг	Фаза развития растений			
	Кущение		Колошение	Молочная спелость
	надземная масса	масса корня	надземная масса	
0 (контроль)	0,45 ± 0,05	0,70 ± 0,13	1,62 ± 0,19	1,39 ± 0,16
10	0,44 ± 0,06	0,84 ± 0,13	1,69 ± 0,19	1,55 ± 0,18
100	0,40 ± 0,07	0,81 ± 0,14	1,29 ± 0,16	1,57 ± 0,18
1000	0,33 ± 0,04*	0,46 ± 0,04*	1,01 ± 0,11*	0,91 ± 0,11*

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

У большинства изученных видов наземных растений величина соотношения хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* (*a/b*) находится в пределах 2,0–3,5 [14]. Изменения в соотношении пигментов могут зависеть от техногенной нагрузки, химического состава поллютантов, видовой принадлежности растения [4] и свидетельствуют о преимущественном разрушении одного из них или активации синтеза других. Внесение в субстрат выращивания овса полевого наночастиц алюминия не приводило к значительным отклонениям в соотношении пигментов. Так, в основных фазах развития овса посевного (кущение, колошение, молочная спелость) соотношение хлорофиллов (*a/b*) находилось в пределах 2,1–3,2.

Повышение содержания каротиноидов у овса в вариантах с использованием наночастиц алюминия в концентрации 100 и 1000 мг/кг можно связывать с адаптацией растений к условиям выращивания на поздних фазах развития (см. табл. 2).

Известно, что каротиноиды, помимо участия в фотосинтезе, выполняют роль компонентов антиоксидантной системы, составляя защиту от свободных радикалов, которые образуются в результате метаболических реакций в листьях и в других органах растений [15]. Основные функции в регуляторной деятельности клетки выполняют пероксидаза и каталаза, обеспечивающие нормальный ход окислительных процессов при различного рода неблагоприятных воздействиях.

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов (мг/г сырой массы) в листьях овса посевного (*Avena sativa* L.), выращенного на субстрате с содержанием различных концентраций наночастиц алюминия

Концентрация наночастиц, мг/кг	Фаза развития растений											
	2-х листьев			Кущение			Колошение			Молочная спелость		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>car</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>car</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>car</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>car</i>
0 (контроль)	1,49	0,88	0,10	1,35	0,54	0,26	0,81	0,32	0,13	1,01	0,39	0,11
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,12	0,07	0,01	0,18	0,03	0,03	0,09	0,04	0,01	0,11	0,05	0,01
10	1,46	0,81	0,11	1,47	0,51	0,25	0,80	0,32	0,13	1,01	0,42	0,15
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,07	0,06	0,01	0,14	0,04	0,03	0,09	0,05	0,01	0,11	0,05	0,01
100	1,39	0,67	0,12	1,46	0,57	0,28	1,21	0,44	0,19	1,47	0,70	0,19
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,01	0,03*	0,01	0,06	0,04	0,02	0,15*	0,06*	0,02*	0,15*	0,08*	0,02*
1000	1,16	0,60	0,10	1,36	0,43	0,23	0,97	0,34	0,16	1,13	0,45	0,24
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,04*	0,03*	0,01	0,15	0,05	0,07	0,11	0,04	0,02	0,15	0,01	0,03*

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

Изменение качества и активности окислительно-восстановительных ферментов может служить определённым показателем реакции растительного организма на неблагоприятные факторы среды и для оценки приспособления растений к сложившимся условиям существования. Механизм фитотоксического действия наночастиц зачастую связывают [16] с накоплением в тканях растений активных форм кислорода.

Так, при прохождении основных фаз развития, у овса посевного (табл. 3), выращенного в присутствии возрастающих доз наночастиц алюминия (10, 100 и 1000 мг/кг), в листьях растений отмечалось достоверное снижение активности каталазы и повышение активности пероксидазы. Например, минимальные значения активности каталазы ($4,73 \pm 0,60$ мл $O_2 \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$) были зафиксированы в листьях овса в фазу колошения на фоне 1000 мг/кг наночастиц алюминия в субстрате выращивания, что могло служить показателем реакции растительного организма на неблагоприятные внешние воздействия.

Активность антиоксидантных ферментов в корнях овса посевного (табл. 4) была ниже, чем в листьях надземной части растений. С наступлением более поздних фаз развития внесение наночастиц алюминия в любой концентрации приводило к достоверным изменениям изученных ферментов: активность каталазы снижалась, активность пероксидазы – повышалась. Выявленные направления в изменении активности антиоксидантных ферментов в корнях овса в целом совпадали с данными по их активности в листьях растений (см. табл. 3).

Таблица 3

Активность антиоксидантных ферментов надземной массы овса посевного (*Avena sativa* L.), выращенного на субстрате с содержанием различных концентраций наночастиц алюминия

Концентрация наночастиц, мг/кг	Фаза развития растений							
	2-х листьев		Кущение		Колошение		Молочная спелость	
	каталаза ¹⁾	пероксидаза ²⁾	каталаза ¹⁾	пероксидаза ²⁾	каталаза ¹⁾	пероксидаза ²⁾	каталаза ¹⁾	пероксидаза ²⁾
0 (контроль)	16,85 ± 1,75	0,06 ± 0,01	11,63 ± 0,42	0,80 ± 0,08	10,53 ± 1,50	0,43 ± 0,07	20,10 ± 0,09	0,50 ± 0,06
10	14,42 ± 1,85	0,06 ± 0,01	8,73 ± 0,40*	0,64 ± 0,07	7,40 ± 0,36*	0,55 ± 0,05	17,30 ± 1,08*	0,56 ± 0,02
100	12,17 ± 1,90*	0,09 ± 0,01*	8,40 ± 0,53*	0,64 ± 0,08	7,90 ± 0,43*	0,54 ± 0,01*	17,07 ± 1,36*	0,68 ± 0,02*
1000	11,80 ± 0,44*	0,09 ± 0,01*	8,70 ± 0,90*	0,68 ± 0,04	4,73 ± 0,60*	0,62 ± 0,07*	12,83 ± 2,06*	0,91 ± 0,08*

Примечание: ¹⁾мл O₂·г⁻¹·мин⁻¹; ²⁾ΔД₆₇₀г⁻¹·с⁻¹; «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

Таблица 4

Активность антиоксидантных ферментов корней овса посевного (*Avena sativa* L.), выращенного на субстрате с содержанием различных концентраций наночастиц алюминия

Концентрация наночастиц, мг/кг	Фаза развития растений				
	Кущение		Колошение		Молочная спелость
	каталаза ¹⁾	пероксидаза ²⁾	каталаза ¹⁾	пероксидаза ²⁾	каталаза ¹⁾
0 (контроль)	3,15 ± 0,11	0,28 ± 0,08	3,30 ± 0,35	0,10 ± 0,01	2,10 ± 0,22
10	2,80 ± 0,30	0,24 ± 0,01	2,80 ± 0,20	0,13 ± 0,02	1,60 ± 0,18*
100	2,80 ± 0,24	0,37 ± 0,03	2,07 ± 0,30*	0,13 ± 0,01*	1,30 ± 0,11*
1000	2,33 ± 0,26*	0,48 ± 0,05*	1,63 ± 0,17*	0,14 ± 0,02*	1,14 ± 0,12*

Примечание: ¹⁾мл O₂·г⁻¹·мин⁻¹; ²⁾ΔД₆₇₀г⁻¹·с⁻¹; «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

В таблице 5 представлены показатели структуры урожая растений овса посевного. Согласно полученным результатам, высота растений, длина соцветий, количество и масса зёрен достоверно снижались при внесении в субстрат выращивания растений наночастиц алюминия в концентрации 1000 мг/кг, что однозначно свидетельствует об их отрицательном воздействии на продукционный процесс.

Снижение показателей урожая овса посевного (*A. sativa*) согласуется с данными о содержании фотосинтетических пигментов и изменении активности антиоксидантных ферментов, что показывает физиолого-биохимические особенности развития растений, испытывающих присутствие различных концентраций наночастиц алюминия. Таким образом установлено, что при относительно высокой концентрации наночастиц алюминия в субстрате выращивания растений, в отношении овса посевного проявляется фитотоксический эффект.

Таблица 5
Структура урожая овса посевного (*Avena sativa* L.), выращенного на субстрате с содержанием различных концентраций наночастиц алюминия

Концентрация наночастиц, мг/кг	Высота растения, см	Длина соцветия, см	Зерно		
			шт./соцветие	г/сосуд	масса 1000 шт., г
0 (контроль)	67,59 ± 3,18	17,95 ± 1,24	9,45 ± 2,15	2,32 ± 0,30	20,64 ± 2,64
10	67,32 ± 3,56	20,00 ± 1,11	9,44 ± 2,40	1,97 ± 0,18	17,37 ± 1,59
100	64,36 ± 4,18	16,01 ± 1,82	7,54 ± 2,12	1,82 ± 0,20	20,16 ± 2,21
1000	45,05 ± 7,28*	10,90 ± 1,25*	1,5 ± 0,34*	0,24 ± 0,02*	13,3 ± 1,1*

Примечание: «*» – разница достоверна в сравнении с контролем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Внесение наночастиц алюминия в субстрат выращивания овса посевного (*Avena sativa* L.) в концентрациях 100 и 1000 мг/кг снижает содержание хлорофиллов *a* и *b* в листьях на ранних фазах развития растений. При этом в фазу колошения и молочной спелости увеличивается количество хлорофиллов и каротиноидов в вариантах с использованием наночастиц. Изменения в содержании фотосинтетических пигментов указывают на перестройку адаптационных механизмов растений в присутствии наночастиц алюминия. В основных фазах развития овса посевного (кущение, колошение, молочная спелость) соотношение хлорофиллов (*a/b*) находилось в пределах 2,1–3,2, что свидетельствует о компенсированной в целом работе пигментного комплекса в присутствии наночастиц в субстрате.
2. При прохождении основных фаз развития, у овса посевного, выращенного в присутствии возрастающих доз наночастиц алюминия (10, 100 и 1000 мг/кг), в листьях и корнях растений отмечается достоверное снижение активности каталазы и повышение активности пероксидазы. Выявленные направления в изменении активности антиоксидантных ферментов указывают на реакцию растительного организма по отношению к неблагоприятным факторам среды.

3. Содержание в субстрате выращивания овса посевного наночастиц алюминия в концентрации 1000 мг/кг приводит к снижению массы корней в фазу кущения, а также надземной массы растений в фазах кущения, колошения и молочной спелости. Высота растений, длина соцветий, количество и масса зёрен также снижаются, что свидетельствует об отрицательном воздействии высоких концентраций наночастиц алюминия на продукционный процесс.

Авторы статьи выражают благодарность д.т.н., профессору Томского политехнического университета Мостовщикову А. В. за интерес к работе и нанопорошок алюминия, предоставленный для проведения вегетационных исследований.

Список литературы

1. Colman B. P. Low concentrations of silver nanoparticles in biosolids cause adverse ecosystem responses under realistic field scenario / B. P. Colman, C. L. Arnaout, S. Anciaux [et al.] // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8, Iss. 2. – e57189. – DOI: 10.1371/journal.pone.0057189.
2. Дыкман Л. А. Взаимодействие растений с наночастицами благородных металлов (обзор) / Л. А. Дыкман, С. Ю. Щёголев // Сельскохозяйственная биология. – 2017. – № 1. – С. 13–24. – DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.13rus.
3. Schwab F. Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants – Critical review / F. Schwab, G. Zhai, M. Kern [et al.] // Nanotoxicology. – 2016 – Vol. 10, Iss. 3. – P. 257–278. – DOI: 10.3109/17435390.2015.1048326.
4. Стасова В. В. Фотосинтетические пигменты в листьях берёзы повислой при техногенном воздействии / В. В. Стасова, Л. Н. Скрипальщикова, Н. В. Астраханцева, А. П. Барченков // Известия вузов. Лесной журнал. – 2023. – № 3. – С. 35–47. – DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47.
5. Khlebtsov N. G. Biodistribution and toxicity of engineered gold nanoparticles: A review of in vitro and in vivo studies / N. G. Khlebtsov, L. A. Dykman // Chem. Soc. Rev. – 2011. – Vol. 40, Iss. 3. – P. 1647–1671. – DOI: 10.1039/c0cs00018c.
6. Yanik F. Toxic effects of aluminum oxide (Al₂O₃) nanoparticles on root growth and development in *Triticum aestivum* / F. Yanik, F. Vardar // Water, Air, and Soil Pollution. – 2015. – Vol. 226, Iss. 9. – P. 296. – DOI: 10.1007/s11270-015-2566-4.
7. Odat N. Genotypic variation in germination and some growth parameters of wheat (*Triticum turgidum* spp. *Durum*) in response to the toxic effect of aluminum oxide (Al₂O₃) nanoparticles / N. Odat // Research on Crops. – 2020. – Vol. 21, Iss. 3. – P. 441–445. – DOI: 10.31830/2348-7542.2020.071.
8. Burklew C. E. Effects of aluminum oxide nanoparticles on the growth, development, and microRNA expression of tobacco (*Nicotiana tabacum*) / C. E. Burklew, J. Ashlock, W. B. Winfrey, B. Zhang // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7, Iss. 5. – e34783. – DOI: 10.1371/journal.pone.0034783.
9. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно-загрязнённых почв. ФР 1.39.2006.02264. – СПб, 2009.
10. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolutions / A. R. Wellburn // J. Plant Physiol. – 1994. – Vol. 144, No 3. – P. 307–313.
11. Воскресенская О. Л. Большой практикум по биоэкологии. Ч. 1 : учеб. пособие / Мар. гос. ун-т; О. Л. Воскресенская, Е. А. Алябьева, М. Г. Половникова. – Йошкар-Ола, 2006. – 107 с. – ISBN 5-94808-239-3
12. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник [для студентов высших с.-х. учеб. заведений по агроном. спец.] / Б. А. Доспехов ; Б. А. Доспехов. – Изд. 6-е, стер., перепеч. с 5-го изд. 1985 г. – М.: Альянс, 2011. – 351 с. – ISBN 978-5-903034-96-3.

13. Шубина А. Г. Сочетанное влияние химических факторов внешней среды на содержание пигментов в проростках гороха посевного *Pisum sativum* / А. Г. Шубина, Л. В. Розенблюм, С. Е. Синютина // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 9, № 4. – С. 688–693. DOI: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.688-693.
14. Дымова О. В. Фотосинтетические пигменты в растениях природной флоры таёжной зоны европейского северо-востока России / О. В. Дымова, Т. К. Головки // Физиология растений. – 2019. – Т. 66, № 3. – С. 198–206. – DOI: 10.1134/S0015330319030035.
15. Кавеленова Л. М. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений / Л. М. Кавеленова, Е. В. Малыгина, С. А. Розно, Ю. В. Смирнов // Поволж. экол. журн. – 2008. – № 3. – С. 200–210. – EDN JWOQFX.
16. Wen Y. Co-exposure of silver nanoparticles and chiral herbicide imazethapyr to *Arabidopsis thaliana*: Enantioselective effects / Y. Wen, L. Zhang, Z. Chen [et al.] // Chemosphere. – 2016. – Vol. 145 – P. 207–214. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.11.035.

REACTION OF OAT PLANTS TO THE PRESENCE OF ALUMINUM NANOPARTICLES IN THE NUTRIENT SUBSTRATE

Sytnikov D. M.¹, Moussa A.², Gubarev F. A.¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

²Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

E-mail: sytnikov@list.ru

Aluminum is widespread in the earth's crust and is widely used in human economic activity, but its physiological functions in plants have not been fully clarified. The direction of the influence of various concentrations of aluminum nanoparticles on the growth and development of plants, as well as the features of physiological and biochemical processes in them, remain insufficiently studied.

The reaction of common oat (*Avena sativa* L.) to the presence of aluminum nanoparticles in the plant growing substrate was studied under the conditions of a pot experiment. The introduction of aluminum nanoparticles into the substrate at concentrations of 100 and 1000 mg/kg reduces the content of chlorophylls *a* and *b* in the leaves at the early stages of plant development. At the same time, at the heading and milky ripeness stages, the amount of chlorophylls and carotenoids increases in the variants using nanoparticles. Changes in the content of photosynthetic pigments indicate a restructuring of the adaptive mechanisms of plants in the presence of aluminum nanoparticles. In the main stages of oat development (tillering, heading, milky ripeness), the chlorophyll ratio (*a/b*) was within 2.1–3.2, which indicates compensated work of the pigment complex in the presence of nanoparticles in the substrate.

During the main development phases, oats grown in the presence of increasing doses of aluminum nanoparticles (10, 100 and 1000 mg/kg) showed a reliable decrease in catalase activity and an increase in peroxidase activity in the leaves and roots of plants. The identified trends in the change in the activity of antioxidant enzymes indicate the reaction of the plant organism to unfavorable environmental factors.

The content of aluminum nanoparticles in the oat growing substrate at a concentration of 1000 mg/kg leads to a decrease in the root mass in the tillering phase, as

well as the aboveground mass of plants in the tillering, heading and milk ripeness phases. The height of plants, the length of inflorescences, the number and weight of grains also decrease, which indicates a negative impact of high concentrations of aluminum nanoparticles on the production process.

Keywords: *Avena sativa* L., aluminum nanoparticles, photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, crop structure, productivity.

References

1. Colman B. P., Arnaout C. L., Anciaux S. [et al.] Low concentrations of silver nanoparticles in biosolids cause adverse ecosystem responses under realistic field scenario, *PLoS ONE*. **8**, 2 (2013). DOI: 2010.1371/journal.pone.0057189.
2. Dykman L. A., Shchyogolev S. Yu. Interactions of plants with noble metal nanoparticles (review), *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. **1** (2017). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.13rus. (in Russ.).
3. Schwab F., Zhai G., Kern M. [et al.] Barriers, pathways and processes for uptake, translocation and accumulation of nanomaterials in plants – Critical review, *Nanotoxicology*, **10**, 3 (2016). DOI: 10.3109/17435390.2015.1048326.
4. Stasova V. V., Skripal'shchikova L. N., Astrakhantseva N. V., Barchenkov A. P. Photosynthetic pigments in silver birch leaves (*Betula pendula* Roth.) with technogenic load, *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*. **3** (2023). DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-35-47. (in Russ.).
5. 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.* **40**, 3 (2011). DOI: 10.1039/c0cs00018c.
6. Yanik F., Vardar F. Toxic effects of aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles on root growth and development in *Triticum aestivum*, *Water, Air, and Soil Pollution*. **226**, 9 (2015). DOI: 10.1007/s11270-015-2566-4.
7. Odat N. Genotypic variation in germination and some growth parameters of wheat (*Triticum turgidum* spp. *Durum*) in response to the toxic effect of aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles, *Research on Crops*. **21**, 3 (2020). DOI: 10.31830/2348-7542.2020.071.
8. Burklew C. E., Ashlock J., Winfrey W. B., Zhang B. Effects of aluminum oxide nanoparticles on the growth, development, and microRNA expression of tobacco (*Nicotiana tabacum*), *PLoS ONE*. **7**, 5 (2012). DOI: 10.1371/journal.pone.0034783.
9. *Methodology for measuring seed germination and root length of higher plant sprouts to determine the toxicity of technogenically contaminated soils*. FR 1.39.2006.02264. St. Petersburg, 2009. (in Russ.).
10. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolutions, *J. Plant Physiol.* **144**, 3 (1994).
11. Voskresenskaya O. L., Alyabysheva E. A., Polovnikova A. G. *Large practical course on bioecology. P. I : manual*, 107 p. (Yoshkar-Ola: Mar. state university, 2006). ISBN 5-94808-239-3. (in Russ.).
12. Dospekhov B. A. *Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results) : textbook*, 351 p. (Moscow: Alliance, 2011). ISBN 978-5-903034-96-3. (in Russ.).
13. Shubina A. G., Rosenblum L. V., Sinyutina S. E. The combined impact of external chemical factors on the content of pigments in seedlings of *Pisum Sativum* Pea, *Transactions TSTU*. **9**, 4 (2023). DOI: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.688-693. (in Russ.).
14. Dymova O. V., Golovko T. K. Photosynthetic pigments in plants of the natural flora of the taiga zone of the European north-east of Russia, *Fiziol. Rast. [Russian Journal of Plant Physiology]*. **66**, 3 (2019). DOI: 10.1134/S0015330319030035. (in Russ.).
15. Kavelenova L. M., Malykhina E. V., Rozno S. A., Smirnov Yu. V. On the methodology of tree leaf ecophysiological studies, *Povolzh. ecol. zhurn.* **3** (2008). EDN JWOQFX. (in Russ.).
16. Wen Y., Zhang L., Chen Z. [et al.] Co-exposure of silver nanoparticles and chiral herbicide imazethapyr to *Arabidopsis thaliana*: Enantioselective effects, *Chemosphere*. **145** (2016). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.11.035. (in Russ.).