

УДК 581.14

А. С. Тугбаева<sup>1</sup>, А. А. Ермошин<sup>1</sup>, Д. С. Плотников<sup>1</sup>,  
Х. Вируянган<sup>2</sup>, И. С. Киселева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина,  
620000, Россия, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51,  
anastasia.tugbaeva@urfu.ru

<sup>2</sup>Университет Внутренней Монголии,  
300071, Китай, г. Хух-хото, ул. Вест колледж, 94

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РОСТА *ZINNIA ELEGANS* ПОСЛЕ $\text{Cu}^{2+}$ -СТРЕССА

**Ключевые слова:** *Zinnia elegans*, ионы меди, анатомия, восстановление.

Стресс, вызванный ионами меди, изучен на многих растениях [1]. Показано, что при этом меняются не только физиологические, но и анатомо-морфологические признаки: увеличивается толщина коры, сосудов ксилемы в корне, что ограничивает транспорт этих ионов в побег [2]. При поступлении  $\text{Cu}^{2+}$  в надземные органы происходят изменения морфологии и анатомии стебля и листьев растений [1, 2].

Целью настоящей работы являлось изучение анатомо-морфологических особенностей тканей корня, гипокотилия и стебля после снятия действия избытка  $\text{Cu}^{2+}$ . Объект исследования – *Zinnia elegans* Jacq., модельное растение для изучения роста клеточных стенок.

Растения *Z. elegans* культивировали на субстрате из смеси перлита и вермикулита в соотношении 1:1 при температуре 25°C с фотопериодом 16 часов. Обработку  $\text{Cu}^{2+}$  проводили с момента появления всходов по 15 день путем внесения в среду Кнопа 50 и 100  $\mu\text{M}$   $\text{CuSO}_4$ . Контроль – раствор Кнопа. Далее растения культивировали без добавления  $\text{Cu}^{2+}$  еще в течение 30 дней. Высоту гипокотилия и междоузлий измеряли на 15 и 45 день, анатомические параметры – на 45 день. Срезы осевых органов окрашивали солянокислым флороглюцином. Размеры клеток измеряли с использованием светового микроскопа Meiji MT 4300L («Meiji Techno», Япония) и ПО Simagis Mesoplant. Данные представлены в виде среднего значения и ошибки. Статистическую обработку проводили в ПО STATISTICA 10 с применением *t*-критерия Стьюдента при уровне  $p < 0,05$  ( $n=30$  для каждого параметра).

Замедление роста и уменьшение линейных размеров органов при стрессе – общая реакция растений, которая может быть связана с перераспределением ресурсов и энергии на борьбу со стрессом [1, 2]. В наших опытах высота 15-и дневных растений *Z. elegans* при действии  $\text{Cu}^{2+}$  (см. рисунок, А) также снижалась. После снятия действия стрессора рост возобновился, о чем свидетельствует увеличение линейных размеров гипокотилия и междоузлий *Z. elegans*. Мы предположили, что это связано с усилением растяжения клеток в латеральном направлении.

Длина клеток метаксилемы возрастала в корне, гипокотиле и междоузлиях, а клеток коры только в гипокотиле и междоузлиях после снятия действия стрессового фактора (таблица). Напротив, в корне длина клеток коры снизилась. Клетки коры корня являются барьером для радиального транспорта ионов меди в стелу, и ионы тяжелых металлов связываются с пектинами и лигнинами клеточных стенок, что снижает их эластичность [2].

Поэтому они не растягивались после снятия действия стрессора. Утолщение осевых органов положительно коррелировало с увеличением диаметра клеток коры и метаксилемы в корне и побеге (таблица).

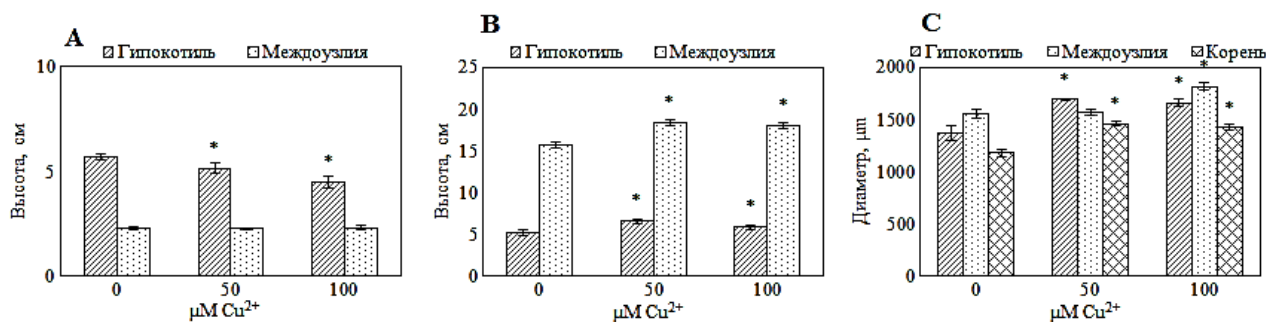


Рисунок. Размеры осевых органов *Z. elegans* в возрасте 15 (А) и 45 (В, С) дней

Таблица

Анатомические параметры клеток коры и метаксилемы *Z. elegans* в возрасте 45 дней

Вариант опыта Параметр		Вариант			
		0 $\mu\text{M Cu}^{2+}$	50 $\mu\text{M Cu}^{2+}$	100 $\mu\text{M Cu}^{2+}$	
Клетки коры	Диаметр на поперечном срезе, $\mu\text{m}$	корень	97.1 $\pm$ 2.6	123.0 $\pm$ 3.4*	133.5 $\pm$ 4.1*
		гипокотиль	79.6 $\pm$ 1.8	89.3 $\pm$ 2.3*	88.9 $\pm$ 1.8*
		междоузлие	35.6 $\pm$ 0.7	41.8 $\pm$ 0.9*	51.8 $\pm$ 0.97*
	Длина на продольном срезе, $\mu\text{m}$	корень	111.8 $\pm$ 5.3	89.3 $\pm$ 2.3*	88.9 $\pm$ 1.8*
		гипокотиль	115.9 $\pm$ 2.7	138.9 $\pm$ 3.1*	159.1 $\pm$ 4.6*
		междоузлие	114.7 $\pm$ 2.4	128.9 $\pm$ 3.0*	122.5 $\pm$ 2.2*
Сосуды метаксилемы	Диаметр на поперечном срезе, $\mu\text{m}$	корень	27.6 $\pm$ 0.8	32.0 $\pm$ 1.1*	31.6 $\pm$ 1.4*
		гипокотиль	26.1 $\pm$ 0.6	31.9 $\pm$ 0.5*	35.9 $\pm$ 0.6*
		междоузлие	26.0 $\pm$ 0.5	29.4 $\pm$ 0.2*	30.0 $\pm$ 0.5*
	Длина на продольном срезе, $\mu\text{m}$	корень	196.5 $\pm$ 3.8	197.4 $\pm$ 4.3	229.8 $\pm$ 6.7*
		гипокотиль	251.0 $\pm$ 2.9	266.2 $\pm$ 8.3	303.1 $\pm$ 9.3*
		междоузлие	300.8 $\pm$ 5.4	341.9 $\pm$ 5.6*	326.2 $\pm$ 9.2*

Растяжение клеток после снятия действия стрессора может быть вызвано восстановлением значений рН апопласта до физиологического уровня и ростом активности ферментов клеточных стенок [2]. Вероятно, схожие механизмы привели к индукции латерального и продольного роста *Z. elegans*.

Таким образом, влияние 50 и 100  $\mu\text{M Cu}^{2+}$  не являлось критичным, так как после снятия действия стрессора растения *Z. elegans* способны восстанавливать рост.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и ДНТ в рамках научного проекта № 19-516-45006 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 02.А03.21.0006).

### Список литературы

1. Yruela I. // Brazilian Journal of Plant Physiology. 2005. Vol. 17. P. 145–156.
2. Holubek R., Deckert J., Zinicovscaia I. et al. // Plants (Basel). 2020. Vol. 9(6). P. 782.