

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 Cu^{2+} в надземные органы происходят изменения морфологии и анатомии стебля и листьев растений [1, 2].

Объект исследования – *Zinnia elegans* Jacq., модельное растение для изучения роста клеточных стенок.

Цель исследования: изучение анатомо-морфологических особенностей тканей корня, гипокотыля и стебля после снятия действия избытка Cu^{2+} .

Материалы и методы

1. Растения *Z. elegans* культивировали на субстрате из смеси перлита и вермикулита в соотношении 1 : 1 при температуре 25°C с фотопериодом 16/8 часов.

Дизайн исследования

Контрольная группа растений

Обработка ионами меди (50 и 100 μM) с 0 по 15 день (раствор Кнопа с Cu^{2+})

1-45 день, раствор Кнопа

Восстановление после действия ионов меди (50 и 100 μM) с 16 по 45 день, раствор Кнопа

Исследование анатомо-морфологических параметров после периода восстановления

2. Высоту гипокотыля и междоузлий измеряли на 15 и 45 день, анатомические параметры – на 45 день.
3. 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.
4. Статистическую обработку проводили в ПО STATISTICA 10 с применением *t*-критерия Стьюдента при уровне $p < 0.05$ ($n=30$ для каждого параметра).

Библиографический список

1. Yuela I. // Brazil J. Plant Physiol. 2005. Vol. 17, P. 145–156.
2. Holubek R., Deckert J., Zinicovskaia I., et al. // Plants (Basel). 2020. Vol. 9(6), P. 782.
3. Rucińska-Sobkowiak. // Acta Physiol Plant 38, 257 (2016).

Результаты и обсуждение

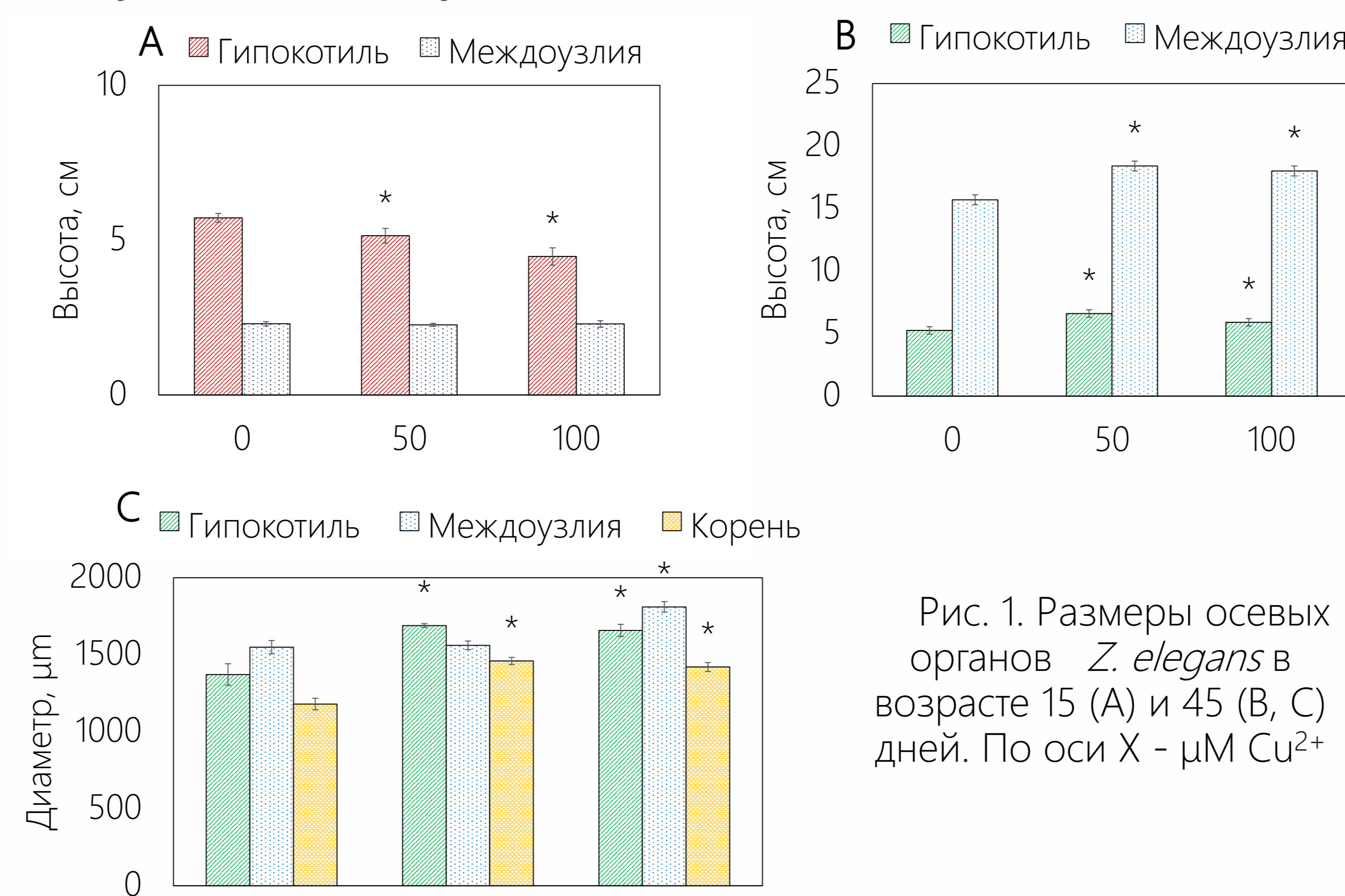


Рис. 1. Размеры осевых органов *Z. elegans* в возрасте 15 (А) и 45 (В, С) дней. По оси X - μM Cu^{2+}

Замедление роста, 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 при действии Cu^{2+} (см. рис 1А) также снижалась. После снятия действия стрессора рост возобновился, о чем свидетельствует увеличение линейных размеров гипокотыля и междоузлий *Z. elegans*. Мы предположили, что растяжение клеток после снятия действия стрессора 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*.

Таблица 1. Линейные размеры клеток паренхимы коры корня, гипокотыля и стебля у 45-дневных растений *Z. elegans* на поперечном и продольном срезах.

Диаметр, μm		Кноп (контроль)	Cu^{2+} 50 μM	Cu^{2+} 100 μM
		Корень	97.1 \pm 2.6	123.0 \pm 3.4*
Гипокотиль	Гипокотиль	79.6 \pm 1.8	89.3 \pm 2.3*	88.9 \pm 1.8*
	Стебель	35.6 \pm 0.7	41.8 \pm 0.9*	51.8 \pm 0.97*
Длина, μm	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*
	Стебель	114.7 \pm 2.4	128.9 \pm 3.0*	122.5 \pm 2.2*

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 в латеральном направлении (таблица 1).

Заключение. При действии ионов ТМ снижается пластичность клеточных стенок, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения сосудов и доли ксилемы в сосудистых пучках, нарушению гидравлической проводимости и водного режима растений [3]. Вероятно, в условиях последействия Cu^{2+} нормализация физиологических процессов привела к увеличению активности камбия и способствовала увеличению доли стелы по сравнению с другими тканями стебля и гипокотыля *Z. elegans*. Увеличение диаметра осевых органов, толщины стелы, диаметра и длины клеток коры и метаксилемы в корнях и гипокотыле свидетельствует о восстановлении роста после снятия напряжения.

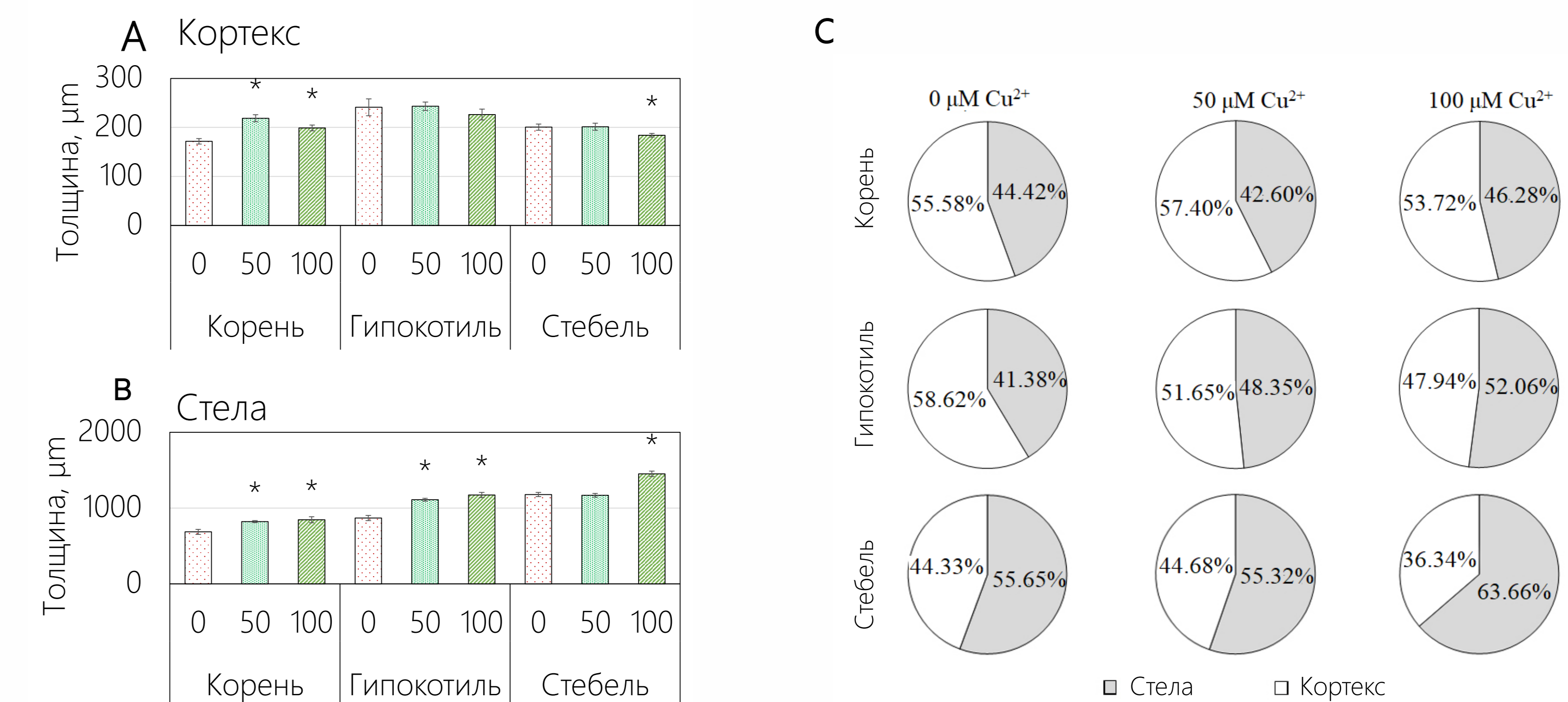


Рис. 2. Толщина кортекса (А) и слоя стелы (В), индекс площади стелы / коры (с) в корне, гипокотыле и стебле у 45-дневных растений *Z. elegans*. По оси X - μM Cu^{2+}

Вероятно, увеличение диаметра стелы гипокотыля в отличие от корня связано с другим перераспределением Cu^{2+} . Сообщалось, что Cu^{2+} локализуются вблизи сосудистого пучка и в клетках сосудистых тканей, и в меньшей степени в кортексе. Это могло активировать другие механизмы адаптации тканей по сравнению с корнем: увеличение диаметра стелы и объема клеток паренхимы стелы *Z. elegans*.

Таблица 2. Линейные размеры и толщина клеточных стенок сосудов метаксилемы корня, гипокотыля и стебля у 45-дневных растений *Z. elegans* на поперечном и продольном срезах.

Диаметр, μm		Кноп (контроль)	Cu^{2+} 50 μM	Cu^{2+} 100 μM
		Корень	27.6 \pm 0.8	32.0 \pm 1.1*
Гипокотиль	Гипокотиль	26.1 \pm 0.6	31.9 \pm 0.5*	35.9 \pm 0.6*
	Стебель	26.0 \pm 0.5	29.4 \pm 0.2*	30.0 \pm 0.5*
Длина, μm	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*
	Стебель	300.8 \pm 5.4	341.9 \pm 5.6*	326.2 \pm 9.2*
Толщина клеточной стенки, μm	Корень	2.71 \pm 0.18	2.51 \pm 0.09	2.30 \pm 0.01*
	Гипокотиль	3.32 \pm 0.22	3.00 \pm 0.1	2.94 \pm 0.14
	Стебель	2.88 \pm 0.07	2.85 \pm 0.07	2.74 \pm 0.16

Дифференцировка тканей стебля *Z. elegans* началась позже гипокотыля (примерно у 8-дневных растений). Рост стебля происходил в основном на этапе восстановления растений после стресса. Поскольку влияние Cu^{2+} было ограничено во время роста стебля, анатомические изменения были менее выраженными. Изменения в тканях были разными у растений, ранее обработанных 50 и 100 мкМ Cu^{2+} . Увеличение диаметра стелы при предобработке 100 мкМ могло быть связано с токсическим воздействием ионов меди.