

УДК 577.352:577.115

ОСОБЕННОСТИ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА ЛИПИДОВ ВАКУОЛЯРНОЙ МЕМБРАНЫ В УСЛОВИЯХ СТРЕССА, ВЫЗВАННОГО ИОНАМИ МЕДИ

© 2024 г. И. С. Капустина^а, В. В. Гурина^{а, *}, Н. В. Озолина^а, Е. В. Спиридонова^а

^аСибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск, 664033 Россия

*e-mail: nichka.g@bk.ru

Поступила в редакцию 03.10.2023

После доработки 27.11.2023

Принята к печати 28.11.2023

Исследовано влияние ионов меди на жирнокислотный состав липидов вакуолярной мембраны тканей корнеплодов столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.). Показано, что в зависимости от применяемой концентрации (100 и 500 мкМ) ионы меди (Cu^{2+}) оказывали разное действие на вакуолярную мембрану тканей корнеплодов столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.). Действие 100 мкМ Cu^{2+} приводило к увеличению суммы жирных кислот (ЖК) на 57 мкг/мг общих липидов по сравнению с контролем. Активность стеароил-десатуразы (SDR) снижалась с 0.87 в контроле до 0.77 при 100 мкМ Cu^{2+} . При концентрации 500 мкМ Cu^{2+} увеличивалась активность SDR до 0.93 и снижалась сумма ЖК на 50 мкг/мг общих липидов по сравнению с воздействием 100 мкМ Cu^{2+} . Кроме этого, происходило увеличение насыщенности липидов тонопласта до 44 и 40 % при 100 и 500 мкМ Cu^{2+} соответственно. По результатам исследования можно предположить, что ЖК липидов тонопласта задействованы в ответных механизмах на стресс, вызванный избыточными концентрациями Cu^{2+} .

Ключевые слова: вакуолярная мембрана, липиды, жирные кислоты, стресс, ионы меди

DOI: 10.31857/S0233475524030096, **EDN:** crxemw

ВВЕДЕНИЕ

В силу прикрепленного образа жизни растения чувствительны к токсическому действию тяжелых металлов (ТМ). Токсическая доза зависит от типа иона, концентрации ионов, вида растения и стадии его роста. Известно, что незаменимые металлы Cu, Fe, Mn, Zn, Mo и Ni поглощаются и накапливаются растениями. Однако чрезмерное накопление этих металлов может быть токсичным для большинства растений [1]. Среди микроэлементов, необходимых растениям, медь (Cu) имеет жизненно важное значение. Cu-ассоциированные белки играют существенную роль в цепи переноса электронов хлоропластов и митохондрий. Ионы меди (Cu^{2+}) участвуют в фотосинтетической реакции фотосистемы II (ФС II) независимо от пластоцианина и стимулируют кислород-выделяющую активность ФС II *in vitro*. Кроме того, Cu^{2+} являются кофактором многих ферментов, таких как полифенолоксидаза, лакказы, цитохром с-оксидаза, супероксиддисмутаза меди/цинка (Cu/Zn-SOD), аминоксидаза. Аминоксидазы, которые связаны с клеточными стенками, катализируют

окисление путресцина с образованием перекиси водорода, необходимой для лигнификации, поперечного связывания белка клеточной стенки и запрограммированной гибели клеток [2]. Cu^{2+} связаны с окислительным фосфорилированием, транспортировкой белков, регуляцией сигналов, а также метаболизмом липидов и железа [3]. Как избыток, так и недостаток меди может привести к аномалиям или дисфункции развития и роста растений, серьезно нарушая критически важные физиологические процессы [4]. Исследования показали, что Cu^{2+} могут изменять скорость пролиферации клеток корневой меристемы, регулируя гормоны, такие как абсцизовая кислота, мелатонин и ауксин [2]. Избыток Cu^{2+} нарушает состав мембран хлоропластов и тилакоидов, что может вызывать окислительный стресс в растительных клетках и уменьшать содержание фотосинтетических пигментов. Следовательно, избыточное количество Cu^{2+} может снижать фотосинтез растений, подавляя биосинтез хлорофилла и ФС II, тем самым отрицательно влияя на растения [5]. Кроме этого, избыточные концентрации Cu^{2+} влияют на

функции некоторых ключевых клеточных компонентов, таких как белки, липиды, ДНК и РНК [2].

Толерантность растений к ТМ основана на нескольких механизмах, к которым относятся связывание с клеточной стенкой, активный транспорт ионов в вакуоль и образование комплексов с органическими кислотами или пептидами [1].

Вакуолярная компартментализация является главным механизмом изолирования ТМ, который в свою очередь зависит от работы двух вакуолярных насосов (H^+ -АТФ-азы, H^+ -пирофосфатазы) и ряда тонопластных транспортеров. Структура и функции вакуолярной мембраны реагируют на ионы ТМ и во многом зависят от изменений, которые происходят в составе липидов тонопласта [6, 7]. Известно, что действие стрессового фактора приводит к значительным изменениям в составе жирных кислот (ЖК) липидов вакуолярной мембраны [8]. В настоящее время мало изучены изменения в составе ЖК вакуолярной мембраны, происходящие в ответ на токсическое действие Cu^{2+} . В связи с этим цель нашего исследования заключалась в анализе изменений жирнокислотного состава тонопласта в условиях стресса, вызванного Cu^{2+} .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использовали корнеплоды столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.). Для оценки влияния Cu^{2+} на ЖК липидов тонопласта, кусочки корнеплодов (1 см³) замачивали в растворе $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ на 16 ч при комнатной температуре. Для контроля использовали дистиллированную воду. Cu^{2+} вносили в концентрациях 100 и 500 мкМ в пересчете на ионы металла. Вакуолярные мембраны получали описанным ранее методом [9].

Общие липиды экстрагировали модифицированным методом Фолча [10]. Для контроля экстрагируемости липидов использовали 10 мкг нонадекановой кислоты (C19:0). Метилловые эфиры ЖК получали по методу Christie [11]. Анализ метиловых эфиров ЖК тонопласта проводили с использованием хромато-масс-спектрометра Agilent Technology 5973N/6890N MSD/DS (США). Для идентификации пиков метиловых эфиров ЖК использовали стандарты метиловых эфиров (Sigma, США) и данные библиотеки масс-спектров NIST 05. Дополнительно рассчитывали сумму ненасыщенных жирных кислот (Σ ННЖК), сумму насыщенных жирных кислот (Σ НЖК). Для характеристики степени ненасыщенности липидов использовали индекс двойной связи (ИДС) [12]:

$$ИДС = \Sigma P_j n_j / 100,$$

где P_j — содержание кислоты, %; n_j — количество двойных связей в каждой кислоте.

Активность ацил-липидных мембранных $\omega 9$ -, $\omega 6$ - и $\omega 3$ -десатураз, отвечающих за введение двойных связей в углеводородные цепи олеиновой (C18:1(n-9)), линолевой (C18:2(n-6)) и α -линоленовой (C18:3(n-3)) ЖК, рассчитывали как стеариол- (SDR), олеил- (ODR) и линолеил- (LDR) десатуразные отношения по формулам [12]:

$$SDR = (\%C18:1) / (\%C18:0 + \%C18:1),$$

$$ODR = (\%C18:2 + \%C18:3) / (\%C18:1 + \%C18:2 + \%C18:3),$$

$$LDR = (\%C18:3) / (\%C18:2 + \%C18:3).$$

Для статистической обработки данных использовали программные пакеты Microsoft Excel и SigmaPlot 12.5. Эксперименты проводили в 3–5 независимых повторностях. Полученные данные представляли в виде средней арифметической (M) или медианы (Me), а разброс значений — в виде стандартной ошибки ($\pm S.E.$) или интерквартильной широты [25 процентиль; 75% процентиль]. С помощью критерия Шапиро–Уилка проверяли нормальность распределения (ГОСТ Р ИСО 5479–2002) [13]. Различия между экспериментальными данными считали статистически значимыми при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что токсические концентрации ТМ запускают процессы окислительного стресса в клетках растений. В результате чего происходит выход из клетки различных веществ, а также изменения в составе липидов и белков, вызванные перекисным окислением мембранных липидов [14]. Поэтому подбор токсических концентраций Cu^{2+} осуществляли при помощи измерения выхода электролитов и содержания диеновых конъюгатов. Согласно полученным данным, наиболее значимое увеличение выхода электролитов было отмечено при концентрации 500 мкМ Cu^{2+} , в то время как увеличение содержания диеновых конъюгатов наблюдали при 100 мкМ. Возможно, такое разное действие Cu^{2+} отразится на составе ЖК липидов тонопласта, поскольку вакуоль и ее мембрана принимает активное участие в ответе клетки на стресс. В связи с этим было интересно выявить участие ЖК липидов тонопласта в условиях стресса, вызванного Cu^{2+} .

Проведенные исследования показали, что в липидах тонопласта в условиях токсического действия

меди увеличивалась сумма абсолютного содержания ЖК. Отмечено, что при 100 мкМ Cu^{2+} это увеличение было на 57 мкг больше по сравнению с контролем. Интересно, что при 500 мкМ Cu^{2+} сумма ЖК снижалась по сравнению с 100 мкМ (табл. 1). Известно, что абиотические стрессы активируют ферменты, которые участвуют в мобилизации ненасыщенных ЖК для ремоделирования мембранных липидов. Ремоделирование ЖК глицеролипидов – это процесс, при котором одна или обе ЖК заменяются, образуя промежуточный лизофосфолипид. Полученные лизофосфолипиды могут быть реацилированы лизофосфолипид-ацилтрансферазами с образованием фосфолипидов с различными ЖК [15]. Ремоделирование глицеролипид-ацилов играет важную роль в удалении окисленных или поврежденных ацильных цепей и высвобождении сигнальных липидов, а также в реакциях на стресс [15]. Возможно, что используемые нами концентрации Cu^{2+} также приводили к ремоделированию мембранных липидов тонопласта для сохранения физико-химических свойств мембраны.

Предполагается, что мембраносвязанные десатуразы ЖК участвуют в ремоделировании глицеролипидов [15]. В данной работе мы использовали методику оценки активности ацил-липидных мембранных $\omega 9$ -, $\omega 6$ - и $\omega 3$ -десатураз на основании состава ЖК суммарных липидов (табл. 1). Согласно полученным данным, было отмечено существенное снижение SDR при обработке 100 мкМ Cu^{2+} , с 0.87 в контроле до 0.77, что говорит о снижении активности $\omega 9$ -десатуразы. Возможно, такое снижение происходит на фоне увеличения стеариновой кислоты ($\text{C}18:0$) с 2.3% в контроле до 5.9% от общего количества ЖК. Содержание олеиновой кислоты ($\text{C}18:1(n-9)$) оставалось на уровне контроля и составляло 19%. При обработке 100 мкМ Cu^{2+} насыщение стеариновой кислоты ($\text{C}18:0$) снижалось и происходило ее накопление.

В случае 500 мкМ Cu^{2+} активность $\omega 9$ -десатуразы возрастала до 0.93 по сравнению с 100 мкМ, при этом снижалось содержание стеариновой кислоты ($\text{C}18:0$) до 1.55% (табл. 1). Известно, что $\omega 9$ -десатуразы катализируют образование двойной связи в положении 9-го углерода в ЖК, которые превращают стеариновую кислоту ($\text{C}18:0$) в олеиновую ($\text{C}18:1(n-9)$) [16]. Можно отметить, что активность $\omega 6$ - и $\omega 3$ -десатураз снижалась в присутствии обеих концентраций Cu^{2+} , приводя к уменьшению количества линолевой ($\text{C}18:2(n-6)$) и линоленовой ($\text{C}18:3(n-3)$) ЖК.

Кроме степени десатурации ЖК, длина их ацильной цепи и их позиционное распределение на

глицериновом остове влияют на организацию и текучесть мембран [15]. Увеличение или уменьшение текучести мембран может быть триггером, запускающим трансдукцию сигналов, которая будет способствовать адаптации растений к стрессовым условиям. Известно, что индекс двойных связей (ИДС) отражает изменения текучести мембраны. Значение ИДС ЖК липидов больше 1.0 говорит о высокой доле в составе липидов ненасыщенных ЖК [17]. Анализ ИДС ЖК липидов тонопласта в условиях стресса, вызванного Cu^{2+} , показал снижение этого показателя с 1.11 в контроле до 0.89 при 100 мкМ (табл. 1). Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что медь индуцировала более высокое насыщение ЖК липидов тонопласта. В связи с этим следует обратить внимание на сумму насыщенных ЖК ($\Sigma\text{НЖК}$) липидов тонопласта. Полученные данные показали, что $\Sigma\text{НЖК}$ увеличивалась на 8% при воздействии 100 мкМ Cu^{2+} .

Заметные изменения в составе ЖК липидов тонопласта отмечены при анализе абсолютного содержания ЖК (табл. 1). В ответ на действие Cu^{2+} (100 мкМ) происходило увеличение количества насыщенной пальмитиновой кислоты ($\text{C}16:0$) на 34% по сравнению с контролем. Известно, что содержание пальмитиновой кислоты ($\text{C}16:0$) увеличивалось при холодовом и окислительном стрессе [18]. Кроме того, происходило увеличение стеариновой ($\text{C}18:0$) насыщенной ЖК в присутствии 100 мкМ Cu^{2+} , в то время как при концентрации 500 мкМ Cu^{2+} содержание этой кислоты снижалось. В присутствии 100 мкМ Cu^{2+} также отмечено значимое увеличение содержания таких насыщенных минорных ЖК, как миристиновая ($\text{C}14:0$) и маргариновая ($\text{C}17:0$), а из ненасыщенных олеиновой ЖК ($\text{C}18:1(n-9)$), что не было обнаружено при воздействии 500 мкМ Cu^{2+} . Олеиновая кислота ($\text{C}18:1(n-9)$), как представитель полиненасыщенных ЖК, принимает участие в механизмах защиты клетки от стресса, обеспечивая поддержание текучести мембран, которая играет важную роль во многих мембранозависимых процессах, например передачи Ca^{2+} -сигнала, модулирование активности мембраносвязанных белков и т.д. Похожее увеличение содержания олеиновой кислоты ($\text{C}18:1(n-9)$) в присутствии 100 мкМ Cu^{2+} было отмечено и для корней кукурузы [19].

Таким образом, можно сделать вывод, что ЖК липидов тонопласта участвуют в ответных механизмах на стресс, вызванный токсическими концентрациями меди. Мы предполагаем, что при действии 100 мкМ меди в вакуолярных мембранах включался процесс ремоделирования мембранных липидов, который приводил к увеличению суммы ЖК в липидах тонопласта. Однако при 100 мкМ

Таблица 1. Содержание жирных кислот липидов тонопласта тканей корнеплодов столовой свеклы после воздействия различных концентраций ионов меди

Жирные кислоты	Контроль			100 мкМ Cu ²⁺		500 мкМ Cu ²⁺	
	мкг/мг общ.лип.	% от ΣЖК	мкг/мг общ.лип.	% от ΣЖК	мкг/мг общ.лип.	% от ΣЖК	
Миристиновая, C14:0	1.3 ± 0.2	0.48 [0.46; 0.6]	3.2 ± 0.4 ^{а, б}	1.1 [1.0; 1.2] ^{а, б}	0.96 ± 0.3 ^б	0.4 [0.3; 0.5] ^б	
Пентадекановая, C15:0	3.3 ± 0.1	1.4 [1.3; 1.5]	4 ± 0.4	1.4 [1.3; 1.5]	3.4 ± 0.7	1.2 [1.2; 1.5]	
Пальмитиновая, C16:0	78.2 ± 6.9	31.7 [30.8; 34.8]	104.9 ± 13.9 ^а	35.5 [33.3; 37.8]	99.7 ± 18	36.7 [35.8; 43.8]	
Пальмитолеиновая, C16:1(n-7)	1.7 ± 0.03	0.73 [0.72; 0.74]	2.2 ± 0.3	0.77 [0.7; 0.8]	2.4 ± 0.8	0.85 [0.71; 1.16]	
Маргариновая, C17:0	0.66 ± 0.1	0.24 [0.24; 0.3]	1.1 ± 0.1 ^{а, б}	0.34 [0.34; 0.38] ^б	0.5 ± 0.05 ^б	0.23 [0.19; 0.23] ^б	
Стеариновая, C18:0	5.4 ± 0.7	2.3 [2.0; 2.5]	15.7 ± 1 ^{а, б}	5.9 [5.1; 6.1] ^{а, б}	3.6 ± 0.4 ^{а, б}	1.6 [1.3; 1.7] ^{а, б}	
Олеиновая, C18:1(n-9)	42.5 ± 3.9	19.3 [17.2; 19.4]	54.5 ± 0.9 ^{а, б}	19.1 [17.9; 19.7]	43.8 ± 2.7 ^б	15.6 [15.6; 20.1]	
Цис-вакценовая, C18:1(n-7)	4.8 ± 0.4	1.9 [1.8; 2.1]	6.2 ± 0.5	2.3 [1.9; 2.4]	4.6 ± 1.4	2.0 [1.4; 2.3]	
C18:1(n-5)	2.0 ± 0.2	0.81 [0.78; 0.90]	—	—	—	—	
Линолевая, C18:2(n-6)	88.5 ± 6.5	39.5 [35.4; 40.8]	89.4 ± 6.6	30.1 [29.2; 31.7]	74.5 ± 13.6	30.3 [26.8; 34.5]	
Линоленовая, C18:3(n-3)	7.8 ± 1.2	3.2 [2.8; 3.7]	9.6 ± 1.4	3.0 [2.8; 3.7]	6.7 ± 1.7	2.3 [2.2; 3.0]	
Эйкозеновая, C20:1(n-9)	—	—	1.6 ± 0.3	0.53 [0.47; 0.66]	1.3 ± 0.23	0.48 [0.47; 0.56]	
Бегеновая, C22:0	—	—	—	—	0.86 ± 0.08	0.39 [0.34; 0.39]	
ΣЖК	235.9 ± 3.8	100 [100; 100]	292.4 ± 18.7 ^{а, б}	100 [100; 100]	242.1 ± 21.3 ^б	100 [100; 100]	
ΣНЖК	88.8 ± 7.8	36.2 [34.9; 39.6]	128.8 ± 13.8 ^а	44.5 [42.2; 45.9]	108.9 ± 19	40.6 [39.4; 47.9]	
ΣННЖК	147.1 ± 5.5	63.8 [60.4; 65.1]	163.6 ± 6.8	55.5 [54.2; 57.8]	133.2 ± 14.7	59.4 [52.1; 60.6]	
ИДС		1.1 [1.03; 1.1]		0.89 [0.89; 0.96]		0.94 [0.83; 1.01]	
SDR		0.87 [0.87; 0.89]		0.77 [0.76; 0.79] ^{а, б}		0.93 [0.92; 0.93] ^б	
ODR		0.69 [0.67; 0.72]		0.66 [0.63; 0.66]		0.62 [0.59; 0.67]	
LDR		0.09 [0.07; 0.09]		0.09 [0.09; 0.1]		0.08 [0.08; 0.09]	

Примечание: n = 3–5. Отличия значимы (p < 0.05); ^a – между вариантами Контроль и 100 мкМ Cu²⁺, ^б – между вариантами 100 мкМ Cu²⁺ и 500 мкМ Cu²⁺. Для доказательства наличия значимых различий между средними M ± S.E. применяли однофакторный дисперсионный анализ с последующим множественным сравнением средних по методу LSD (Least Significant Difference) Фишера – метод группирования выборок с наименьшей значимой разностью. Для доказательства наличия значимых различий между медианами Me [25 процентиль; 75 процентиль] использовали N-критерий Краскела–Уоллиса, и последующее множественное сравнение медиан проводили по методу Стьюдента–Ньюмена–Кейлса.

Cu^{2+} десатуразы ЖК не вовлекались в процесс ремоделирования, так как снижалась их активность. В результате этого увеличивалась насыщенность ЖК мембранных липидов тонопласта, что делало мембрану менее жидкой, тем самым снижая ее проницаемость для Cu^{2+} и выступая в роли механизма адаптации. Выявлено, что при 500 мкМ Cu^{2+} увеличивалась активность SDR и снижалась сумма ЖК по сравнению с 100 мкМ. Возможно, данная концентрация Cu^{2+} является более токсичной, в связи с чем происходит удаление избытка Cu^{2+} в вакуоль. В этом процессе задействованы специфические белки тонопласта, для работы которых необходима более жидкая фаза мембраны.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источники финансирования. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-26-00208, <https://rscf.ru/project/23-26-00208/> на оборудовании Центра коллективного пользования “Биоаналитика” Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН (г. Иркутск).

Соответствие принципам этики. Настоящая статья не содержит описания каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Memon A.R., Schröder P. 2009. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **16**, 162–175.
2. Chen G., Li J., Han H., Du R., Wang X. 2022. Physiological and molecular mechanisms of plant responses to copper stress. *Int. J. Mol. Sci.* **23**, 12950.
3. Leng X., Mu Q., Wang X., Li X., Zhu X., Shang-guan L., Fang J. 2015. Transporters, chaperones, and P-type ATPases controlling grapevine copper homeostasis. *Funct. Integr. Genom.* **15**, 673–684.
4. Mir A.R., Pichtel J., Hayat S. 2021. Copper: Uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *Biomaterials*. **34**, 737–759.
5. González-Mendoza D., Gil F.E., Escoboza-García F., Santamaría J.M., Zapata-Pérez O. 2013. Copper stress on photosynthesis of black mangle (*Avicennia germinans*). *An. Acad. Bras. Cienc.* **85**, 665–670.
6. Sharma S.S., Dietz K.J., Mimura T. 2016. Vacuolar compartmentalization as indispensable component of heavy metal detoxification in plants. *Plant Cell Environ.* **39** (5), 1112–1126.
7. Нурминский В.Н., Ракевич А.Л., Мартынович Е.Ф., Озолина Н.В., Нестеркина И.С., Колесникова Е.В., Пилипченко А.А., Салеев Р.К., Чернышов М.Ю. 2015. Особенности структуры вакуоли растительной клетки, выявленные с помощью конфокальной микроскопии. *Цитология*. **57** (6), 443–451.
8. Ozolina N.V., Gurina V.V., Nesterkina I.S., Nurminsky V.N. 2020. Variations in the content of tonoplast lipids under abiotic stress. *Planta*. **251** (6), 107.
9. Салеев Р.К., Кузеванов В.Я., Хаптагаев С.Б., Копытчук В.Н. 1981. Выделение и очистка вакуолей и вакуолярных мембран из клеток растений. *Физиол. растений*. **28**, 1295–1305.
10. Folch J., Sloan Stanley G.H., Lees M. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *J. Biol. Chem.* **226**, 497–509.
11. Christie W.W. 1993. Preparation of ester derivatives of fatty acids for chromatographic analysis. *Adv. Lipid Methodol.* **2**, 69–111.
12. Нохсорова В.В., Дударева Л.В., Петров К.А. 2020. Сезонная динамика липидов и их жирных кислот в почка *Betula pendula* Roth и *Alnus alnobetula* subsp. *fruticosa* (Rupr.) Raus в условиях криолитозоны. *Физиол. раст.* **67** (3), 319–328.
13. Гланц С. 1999. Медико-биологическая статистика. М.: Практика. 459 с.
14. Shahid M., Pourrut B., Dumat C., Nadeem M., Aslam M., Pinelli E. 2014. Heavy-metal-induced reactive oxygen species: Phytotoxicity and physiochemical changes in plants. *Rev. Environ. Contamin. Toxicol.* **232**, 1–44.
15. Yu L., Zhou C., Fan J., Shanklin J., Xu C. 2021. Mechanisms and functions of membrane lipid remodeling in plants. *Plant J.* **107** (1), 37–53.
16. Halim N.F.A.A., Ali M.S.M., Leow A.T.C., Rahman R.N.Z.R.A. 2022. Membrane fatty acid desaturase: Biosynthesis, mechanism, and architecture. *App. Microbiol. Biotechnol.* **106** (18), 5957–5972.
17. Ковалевская Н.П. 2023. Влияние ауксина на жирнокислотный состав и активность ацил-липидных десатураз в проростках яровой пшеницы *Triticum aestivum* L. *Биол. мембраны*. **40** (1), 71–80.
18. Жуков А.В. 2015. Пальмитиновая кислота и ее роль в строении и функциях мембран растительной клетки. *Физиол. раст.* **62** (5), 751–760.
19. Chaffai R., Seybou T.N., Marzouk B., Ferjani E.El. 2009. A comparative analysis of fatty acid composition of root and shoot lipids in *Zea mays* under copper and cadmium stress. *Acta Biol. Hungar.* **60** (1), 109–125.

Characteristics of the Fatty Acid Composition of the Vacuolar Membrane Lipids Under the Conditions of Stress Induced by Copper Ions

© 2024 г. I. S. Kapustina¹, V. V. Gurina^{1,*}, N. V. Ozolina¹, E. V. Spiridonova¹

¹Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

*e-mail: nichka.g@bk.ru

The effect of different concentrations of copper ions (100 and 500 μM) on the fatty acid composition of the vacuolar membrane lipids of beet root tissues (*Beta vulgaris* L.) was studied. Exposure to 100 μM copper led to an increase in the content of FAs by 57 $\mu\text{g}/\text{mg}$ of total lipids as compared to the control. Stearoyl desaturase (SDR) activity decreased from 0.87 in the control to 0.77 at 100 μM copper. Exposure to 500 μM copper caused an increase in the SDR activity up to 0.93, but the proportion of FAs decreased by 50 $\mu\text{g}/\text{mg}$ of total lipids compared with 100 μM copper. In addition, there was an increase in the saturation of tonoplast lipids to 44 and 40% at 100 and 500 μM Cu^{2+} , respectively. The results suggest that FAs of tonoplast lipids are involved in the stress response mechanisms induced by excessive Cu^{2+} concentrations.

Keywords: vacuolar membrane, lipids, fatty acids, stress, copper ions