

на действие внешних факторов. В частности, установлена роль жасмонатов в защите растений от патогенов и насекомых-вредителей, однако их участие в устойчивости к абиотическим факторам изучено пока недостаточно. В связи с этим нами проведено исследование влияния МЖ на растения пшеницы, находящиеся при обычной или в условиях действия низкой положительной температуры. Установлено, что обработка растений пшеницы МЖ (1 мкМ) вызывает повышение их холодоустойчивости в условиях нормальной температуры (22°C). При этом, у проростков под влиянием МЖ увеличивается интенсивность фотосинтеза и активность ключевых антиоксидантных ферментов – супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ) и пероксидазы (ПО). Активизация антиоксидантной системы (АОС), в свою очередь, способствовала уменьшению содержания в листьях растений пероксида водорода. Если же обработка растений МЖ предшествовала воздействию низкой температуры (4°C), то наблюдалось большее повышение холодоустойчивости пшеницы, чем без МЖ, а также снижение уровня одного из конечных продуктов перекисного окисления липидов – малонового диальдегида (МДА) и пероксида водорода. Кроме того, при холодовом воздействии происходило увеличение активности СОД, КАТ и ПО, причем в листьях растений, обработанных МЖ, зафиксирована повышенная по сравнению с контролем (без обработки МЖ) активность указанных ферментов. Помимо этого, МЖ в условиях действия низкой температуры стимулировал интенсивность фотосинтеза и накопление свободного пролина. Таким образом, из полученных данных следует, что МЖ способен вызывать повышение холодоустойчивости растений пшеницы как при обычной, так и при пониженной температуре, что выражается в стабилизации фотосинтеза, увеличении активности АОС, снижении уровня окислительного стресса в клетках листьев и ряде других физиолого-биохимических изменений, носящих адаптивный характер.

О механизмах устойчивости и адаптации растений к тяжелым металлам

Казнина Н.М.*, Титов А.Ф.

Институт биологии - обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Российская Федерация
*Email: kaznina@krc.karelia.ru

Проблема устойчивости растений к тяжелым металлам многие годы занимает одно из центральных мест в экологической физиологии растений в силу постоянно усиливающегося загрязнения окружающей среды этими химическими элементами. Известно, что тяжелые металлы токсичны для растений, однако есть виды (так называемые «исключатели»), которые способны расти в условиях довольно высоких их концентраций в почве, накапливая при этом значительное количество ионов металлов в корнях. Анализ современной литературы и результаты собственных исследований позволяют заключить, что известные на сегодняшний день защитно-приспособительные механизмы, определяющие устойчивость растений к тяжелым металлам, можно условно разделить на две группы: а) действующие вне клетки и препятствующие их поступлению в клетку и б) действующие внутри клетки и обеспечивающие связывание и/или удаление ионов металлов из метаболически активных компарментов. Внутриклеточные механизмы металлоустойчивости изучены к настоящему времени гораздо лучше, однако и здесь остается немало нерешенных вопросов. Например, слабо изучены механизмы, обеспечивающие

удаление металлов из клетки, в том числе с участием трансмембранных белков, осуществляющих перенос ионов через тонопласт в цитозоль и далее через плазмалемму в апопласт. Почти ничего не известно о роли водородных помп тонопласта и плазмалеммы в процессе адаптации растений к тяжелым металлам, хотя этот вопрос обсуждается в литературе. Поиск ответов на эти и другие вопросы необходим для более глубокого понимания механизмов, обеспечивающих высокую устойчивость и адаптацию растений к высоким концентрациям тяжелых металлов. Причем ответы на них важны не только в теоретическом, но и в практическом плане, так как они могут быть использованы в селекционно-генетических работах, направленных на отбор и/или создание сортов (генотипов, экотипов), способных проявлять интересующие нас свойства в условиях загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами.

Снижение скорости роста, генерация активных форм кислорода и индукция запрограммированной клеточной гибели в корнях *Triticum aestivum* L. при обработке наночастицами меди

Кирисюк Ю.В.^{А,*}, Демидчик В.В.^А

^АБелорусский государственный университет, Минск, Беларусь

^ББрестский государственный университет, Брест, Беларусь

*Email: yulya.kirisyuk@mail.ru

Интенсивное применение наноматериалов, в особенности, металл-содержащих наночастиц, может привести к их накоплению в окружающей среде в токсических для растений концентрациях. Ряд исследований показывает, что уровень некоторых металл-содержащих наночастиц в почве, загрязненной городскими отходами, уже сейчас достигает нескольких миллиграмм на килограмм сырой почвы. Несмотря на прогрессирующее количество публикаций по теме нанотоксичности, влияние металл-содержащих наночастиц на организм растения остается изученным крайне плохо. В представленной работе было исследовано первичное влияние медных наночастиц на физиологические процессы в корне важнейшей сельскохозяйственной культуры – пшеницы. В качестве объекта исследования выступали проростки *Triticum aestivum* L. (сорт Дарья). Тестировалось влияние медных наночастиц ($d = 38 \pm 4$ нм; МТИ Corporation, США) и медного балка (< 75 мкм; Sigma), а также супернатанта, полученного после центрифугирования наночастиц. Использовалась стандартная световая и эпифлуоресцентная микроскопия, рулонные ростовые тесты и техника пэтч-кламп. В результате проведенных исследований было установлено, что наночастицы меди при введении их в среду выращивания растений в концентрации свыше 50 мг/л снижают скорость роста корней пшеницы по сравнению с балком и супернатантом. Они также стимулировали генерацию активных форм кислорода (тест на основе флуоресцентного зонда дигидрорезитидиум) и индуцировали увеличение доли клеток корня пшеницы с симптомами запрограммированной клеточной гибели (с 3-5% до 40-70%). При этом наблюдалась конденсация цитоплазмы и отделение плазматической мембраны от клеточной стенки, а также потемнение цитоплазмы и формирование в ней темных телец. При обработке растений медным балком или супернатантом эти повреждения проявлялись в меньшей степени. Анализ биохимических симптомов запрограммированной клеточной гибели (уровня протеазной активности), активирующихся в клетках корня пшеницы под действием наночастиц меди, был