

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ КЛЕТОК ПРИ ФЛУКТУАЦИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ

В.К. Войников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск, Россия, VVK@sifibr.irk.ru

Аннотация. При флуктуациях температуры в клетках растений происходят существенные изменения метаболизма. Они затрагивают прежде всего энергетический метаболизм и экспрессию генов. Происходит взаимодействие энергетической и информационной систем клетки. В рамках механизмов такого взаимодействия, вероятно, работает митохондриальная сигнальная система, которая включает следующие этапы: рецепция сигнала митохондриальными мембранами, изменение состава мембранных липидов, активация фосфолипазы A_2 , увеличение количества свободных жирных кислот, изменение редокс-состояния митохондрий, формирование и передача сигнала в ядро (Ca^{2+}), экспрессия соответствующих генов, синтез стрессовых белков, функционирование этих белков, адаптивные перестройки метаболизма.

Ключевые слова: митохондрии, ядерно-митохондриальные взаимоотношения, стресс

DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-6-8

За прошедшие с открытия стрессовых белков растений годы достигнут несомненный прогресс. К настоящему времени точно установлено, что, как ответ растительного организма на низкотемпературный стресс, так и формирование закаленного состояния растения начинается непосредственно с момента начала охлаждения и протекает при участии определенных белков. Кроме значительного числа вовлеченных в эти процессы ферментов, к настоящему времени выделено несколько семейств белков, специфически связанных с этими процессами. Это шапероны и дегидрины, антифризные белки, многофункциональные белки, регулирующие процессы трансляции и транскрипции и белки, разобщающие во время низкотемпературного стресса окисление и фосфорилирование. Синтез этих белков обеспечивается в большинстве случаев ядерными генами, экспрессия которых индуцируется во время температурного стресса и закаливания и определяется его условиями.

Необходимо отметить, что, хотя и имеются отдельные гипотезы о биохимических механизмах участия индуцируемых низкой температурой белков в процессах развития холодоустойчивости растений, о роли конкретных белков, за исключением представителей нескольких семейств белков, таких, как дегидрины, антифризные белки и некоторые другие, в этих процессах мало, что известно.

В последние десятилетия начинают интенсивно изучаться механизмы индукции экспрессии генов при гипотермии и специфичность этих генов и кодируемых ими белков. Исследования в данной области в настоящее время интенсивно проводятся во всем мире. Особенно интенсивно эти исследования проводятся в связи с проводимым полным сиквенсом геномов растений. В то же время необходимо отметить, что исследования экспрессии генов во время низкотемпературного стресса проводятся несистематически, в основном они заключаются в установлении факта индукции экспрессии отдельного гена или семейства генов либо увеличении содержания отдельного стрессового белка. Практически не исследуется взаимосвязь между индукцией отдельных генов или их семейств и в проводимых исследованиях отсутствует комплексный подход к изучаемому явлению. Только в последнее время начинают создаваться «генные сети», связывающие воедино описание

экспрессии различных генов в определенных условиях. Данный подход к исследованиям чрезвычайно перспективен и позволяет надеяться на создание в дальнейшем геной сети, описывающей комплексный ответ генома растения на низкотемпературный стресс.

При температурных стрессах в клетках растений функционирует митохондриальный сигналинг, который включает в себя взаимодействие информационной и энергетической систем клетки. Показано, что флуктуации температуры вызывают изменения в энергетической активности митохондрий растений. Эти изменения связаны с перестройкой в составе липидов митохондриальных мембран, что вероятно, является сигналом о начале действия температурного стресса. Происходит изменение редокс-состояния митохондриальных мембран и формируется сигнал о стрессе. После трансдукции сигнала в ядро изменяется экспрессия генов и происходит синтез стрессовых белков, которые попадают в различные компартменты клетки, изменяя ее метаболизм и устойчивость к стрессу.

В последние годы становится понятно, что у растений существуют такие биохимические механизмы защиты от низкотемпературного стресса, которые, как считалось раньше, имеются только у животных. В частности, такими механизмами являются синтез в ответ на низкотемпературный стресс у злаков антифризных белков, выполняющих функцию сходную с той, которую, как было установлено еще в 60-е годы, эти белки выполняют у антарктических рыб. Установлено также наличие в растениях разобщающих белков, вызывающих термогенез в растительных митохондриях, хотя ранее такой механизм защиты от низкотемпературного стресса считался прерогативой теплокровных животных.

В связи с этим необходимо отметить, что обнаружение у растений белков, разобщающих окисление и фосфорилирование в митохондриях, объясняет ранее установленный факт термогенеза в холодоустойчивых озимых злаках во время низкотемпературного стресса

Наличие у злаков трех термогенных систем, связанных с разобщением окисления и фосфорилирования в митохондриях, в проростках холодоустойчивых озимых злаков, по-видимому, связано с особенностями их жизненного цикла, поскольку они вынуждены переживать осенние и весенние заморозки, когда температура в течение короткого промежутка времени падает до 0°C и даже ниже. Озимые злаки имеют многочисленные защитные системы, которые позволяют им во время холодового шока эффективно выкачивать воду из цитоплазмы в апопласт и, следовательно, избегать образования кристаллов льда внутри их клеток, а также много других защитных систем, связанных с синтезом различных классов стрессовых белков. Тем не менее, для активации всех этих систем во время низкотемпературного стресса необходимо определенное время. В этом случае быстрое разобщение окисления и фосфорилирования в митохондриях и связанный с этим процессом термогенез позволяет растению выиграть время, необходимое для активации этих систем. В связи с этим присутствие трех термогенных систем у озимых злаков является приспособлением к озимому образу жизни и способом защиты от заморозков и переохлаждения.

В рамках механизмов взаимодействия информационной и энергетических систем клетки, вероятно, работает митохондриальная сигнальная система, которая включает следующие этапы:

- 1) рецепция сигнала митохондриальными мембранами;
- 2) изменение состава мембранных липидов;
- 3) активация фосфолипазы A_2 ;
- 4) увеличение количества свободных жирных кислот;
- 5) изменение редокс-состояния митохондрий;
- 6) термогенез;
- 7) формирование и передача сигнала в ядро (Ca^{2+});
- 8) экспрессия

соответствующих генов; 9) синтез стрессовых белков; 10) функционирование этих белков; 11) адаптивные перестройки метаболизма.

Таким образом, можно сделать заключение, что сигнал об изменении экспрессии ядерных генов формируется в цитоплазме и затем передается в ядро.

Известно, что многие признаки устойчивости растений к неблагоприятным условиям внешней среды контролируются цитоплазмой, в том числе митохондриями, и передаются потомкам по материнской линии.

Можно предположить, что интересной и перспективной является задача: получить сельскохозяйственные растения высокопродуктивные и устойчивые к неблагоприятным факторам внешней среды. В клетках таких растений должны быть объединены ядро от продуктивного растения и цитоплазма от высокоустойчивого. Один из подходов в решении такой задачи – использование методов клеточной биологии и биотехнологии.

ENERGETIC AND INFORMATION SYSTEMS OF PLANT CELLS AT TEMPERATURE FLUCTUATIONS

V.K. Voinikov

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia,
VVK@sifibr.irk.ru

Abstract. Probably within the frames of mechanisms of interaction information and energetic systems of a cell probably a mitochondrial signal system starts working which includes following stages: 1) signal reception by mitochondrial membranes; 2) change of lipid membrane structure; 3) activation of A₂phosolipase; 4) increase of amount of free fatty acids; 5) change of a redox-condition of mitochondria; 6) thermogenesis; 7) formation and signal transmission to a nucleus (Ca²⁺); 8) expression of corresponding genes; 9) synthesis of stress proteins; 10) functioning of these proteins; 11) adaptive reorganizations of metabolism.

Keywords: *mitochondria, nuclear-mitochondrial interactions, stress*