

Таким образом, независимо от типа объекта исследования и его местоположения выявлено влияние КВЧ-излучения на структуру воды.

Это влияние вызвано взаимодействием электрических дипольных (1,8D) моментов молекул воды с вектором напряженности \vec{E} электрического поля электромагнитной волны КВЧ-излучения. При этом происходит образование ассоциаций молекул воды (кластеров), скрепленных различными видами сил, в том числе с участием водородных связей. Это означает, что под действием КВЧ-излучения протекают квазихимические реакции с участием молекул воды.

Литература

1. Лукьяница В.В. Структурные изменения воды под действием аппарата УВЧ – терапии /В.В Лукьяница// Медицинский журнал, - 2010, - №4. – С. 87-90.

КАДМИЙ И ХЛОРОПЛАСТЫ: МИФЫ И РЕАЛЬНОСТЬ

Лысенко Е.А.

Институт физиологии растений РАН, Москва, Россия

Кадмий (Cd) – один из наиболее токсичных тяжелых металлов. Кадмий токсичен для растений и животных, включая человека. Растения используют многочисленные системы защиты, основная задача которых ограничить поступление кадмия в листья, а в листьях минимизировать их проникновение в клетки. Однако небольшое количество кадмия всё же проникает в метаболически важные компартменты и оказывает токсическое действие.

Одной из основных мишеней кадмия является фотосинтетический аппарат. В экспериментах *in vitro* показано, что кадмий сильно ингибирует активность фотосистемы 2 и почти не влияет на активность фотосистемы 1. Это было показано ещё в пионерской работе Bazzaz Govindjee [1], и было подтверждено ещё в последующих работах. В этих работах использованы огромные концентрации кадмия (миллимолярный диапазон) и краткие (минутные) экспозиции. Зачастую исследования выполнены на не интактных хлоропластах или на тилакоидах. Эти работы показывают, что было бы, если бы растения не защищали себя столь тщательно от поступления туда кадмия.

В лабораторных исследованиях, использующих целые растения эффекты сильно отличаются от вышеописанных. Так растения риса, выращенные на водной культуре, содержащей кадмий в концентрации 75 мкМ, демонстрируют стабильность своего фотосинтетического аппарата в течение 4 недель воздействия, уровень белков D1, D2, Lhcb, OEE1 практически не изменялся [2]. Однако в изолированных хлоропластах, инкубированных в растворе кадмия с концентрацией 5 мкМ уже через 15 минут наблюдалось существенное уменьшение уровня белка D1, а через 30 минут его дегградация была катастрофической [2]. Одним из важных вопросов оказывается – насколько велика порция кадмия, которая может проникнуть в хлоропласты интактных растений? Какова её доля от всего кадмия поступившего в лист из корней?

В начале века были выполнены два исследования [3, 4]. Они очень сильно отличались практически по всем параметрам, поэтому в них получились совершенно разные результаты. По данным одного в хлоропласты проникает очень мало кадмия - 0,02% от всего кадмия в листе [3], по данным другого довольно много – 10-15% [4] (расчет в [5]). Проведенное нами исследование заполнило разрыв между этими результатами. Оказалось, что в единых условиях эксперимента растения из одного семейства накапливают кадмий по-разному. Кукуруза накапливала 0,2-0,3%, а ячмень – немного более 1% кадмия, поступившего в лист [5]. Наши данные показали, что поступление кадмия в хлоропласты растений может варьировать в очень широком диапазоне.

Зная величины накопления кадмия в хлоропластах, можно изучить их корреляцию с токсическим эффектом. Из всех изученных параметров накопление кадмия в хлоропластах коррелировало лишь с фотоингибированием фотосистемы 2 (параметр NPQ-q1) [5]. Вероятно, фотоингибирование является результатом прямого воздействия кадмия на фотосинтетический аппарат, остальные многочисленные эффекты скорее являются опосредованными его воздействием на другие процессы в растении.

В ранее опубликованной работе [6] предполагалось, что кадмий может замещать в антенных хлорофиллах магний, а кадмий-замещенные хлорофиллы гораздо хуже поглощают свет, что обуславливает подавление роста растений. Наш анализ своих и литературных данных показал, что в интактных растениях в хлоропластах содержание кадмия столь мало, что его не хватит даже на замещение магния в 1% антенных хлорофиллов [5].

Другой механизм связывают с воздействием кадмия на водоокисляющий комплекс фотосистемы 2 [7]. Наши новые данные показывают, что количество кадмия в тилакоидных мембранах сопоставимо с количеством

марганцевых кластеров. Следовательно, механизм, обнаруженный *in vitro* может реализовываться *in vivo*.

Еще один потенциальный механизм – нарушение кадмием последовательности белков антенн фотосистемы 2. Изменение размера полипептидов было обнаружено у антенных белков ржи Lhcb1, Lhcb2, Lhcb3 [8]. Мы изучили у близких растений (ячмень, кукуруза) в близких условиях выращивания и обработки кадмием белок Lhcb1 и не обнаружили изменения размера данного полипептида [5]. Возможно, эффект, наблюдавшийся в работе [8] связан с тем, что исследователи выдерживали выделяемый белковый препарат 30 минут при комнатной температуре, а мы все процедуры проводили «на льду». В этом случае, эффект следует рассматривать как *in vitro*, но не *in vivo*.

Кадмий безусловно очень токсичный тяжёлый металл, однако, можно найти примеры его положительного влияния на отдельные молекулярные процессы. Так, например, при дефиците цинка кадмий может частично замещать его отсутствие и восстанавливать сплайсинг мРНК, подавленный в отсутствие цинка [9].

Работа поддержана грантом РФФИ №14-14-00584.

Литература

1. Bazzaz MB, Govindjee (1974) Effects of cadmium nitrate on spectral characteristics and light reactions of chloroplasts. // Environ. Lett. V.6. P.1–12.
2. Pagliano C, Raviolo M, Dalla Vecchia F, Gabbrielli R, Gonnelli C, Rascio N, Barbato R, La Rocca N (2006) Evidence for PSII donor-side damage and photoinhibition induced by cadmium treatment on rice (*Oryza sativa* L.)// J. Photochem. Photobiol., B V.84. P.70–78.
3. Baryla A, Carrier P, Franck F, Coulomb C, Sahut C, Havaux M (2001) Leaf chlorosis in oilseed rape plants (*Brassica napus*) grown on cadmium-polluted soil: causes and consequences for photosynthesis and growth. *Planta* 212:696–709.
4. Pietrini F, Iannelli MA, Pasqualini S, Massacci A (2003) Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. *Plant Physiol* 133:829–837.
5. Lysenko E.A., Klaus A.A., Pshybytko N.L., Kusnetsov V.V. (2015) Cadmium accumulation in chloroplasts and its impact on chloroplastic processes in barley and maize.// *Photosynth. Res.* V.125. P.291-303.
6. Kupper H, Kupper F, Spiller M (1998) In situ detection of heavy metal substituted chlorophylls in water plants.// *Photosynth Res.* V.58. P.123–133.

7. Faller P, Kienzler K, Krieger-Liszka A (2005) Mechanism of Cd²⁺ toxicity: Cd²⁺ inhibits photoactivation of photosystem II by competitive binding to the essential Ca²⁺ site.// Biochim Biophys Acta. V.1706. P.158–164.
8. Janik E., Maksymiec W., Mazur R., Garstka M., Gruszecki W.I. (2010) Structural and functional modifications of the major light-harvesting complex II in cadmium- or copper-treated *Secale cereale*.// Plant Cell Physiol. V.51(8). P.1330-1340.
9. Lee M.J., Ayaki H., Goji J., Kitamura K., Nishio H. (2006) Cadmium restores in vitro splicing activity inhibited by zinc-depletion.// Arch. Toxicol. V.80. P.638–643.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХЛОРОПЛАСТНЫХ И МИТОХОНДРИАЛЬНЫХ ГЕНОМОВ У ВНЕЯДЕРНОГО ХЛОРОФИЛЬНОГО МУТАНТА И РЕВЕРТАНТА ПОДСОЛНЕЧНИКА

Макаренко М.С., Усатов А.В., Азарин К.В., Маркин Н.В.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Признаки растений формируются в результате скоординированного взаимодействия трех геномов – ядерного, пластидного и митохондриального. Несмотря на ограниченную информационную емкость, изменчивость геномов пластид и митохондрий является значимым фактором в эволюции и адаптации растительных организмов.

Уникальная коллекция внеядерных мутантов подсолнечника (*Helianthus annuus* L.) с разной степенью выраженности хлорофильных дефектов, созданная в Южном федеральном университете, является хорошей моделью для изучения различных аспектов ядерно-цитоплазматических взаимоотношений и, в частности, роли цитогенов в таком сложном и полигенно контролируемом процессе как фотосинтез. Известно, что хлДНК кодирует ряд компонентов белок-синтезирующей системы пластид, а также около половины белков, участвующих в фотосинтезе: 19 белков комплексов ФС1 и ФС2, 11 белков комплекса цитохром b/f, АТФ-синтазы и ряд белков стромы хлоропластов [1]. Тесное взаимодействие митохондрий и хлоропластов наблюдается в процессах фотодыхания и метаболизма гликолевой кислоты, в связи с этим мтДНК также может участвовать в регуляции фотосинтеза [2].