

УДК 581.1

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ХРОНИЧЕСКОЙ И ОСТРОЙ ГИПЕРТЕРМИИ И НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА РАСТЕНИЙ *PISUM SATIVUM* L.© 2014 г. **Я.В. Середнева, А.С. Патунина, Ю.В. Сеницына, А.П. Веселов**

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

seredneva.yana@mail.ru

Поступила в редакцию 26.09.2013

Исследовано влияние острой и хронической гипертермии, переменного магнитного поля (15 Гц, 1.5 мТл) на состояние фотосинтетического аппарата *Pisum sativum* L. Показано, что острая и хроническая гипертермия подавляют фотосинтетическую активность. Магнитное поле не изменяет скорость реакции Хилла, однако оказывает корректирующее влияние на квантовый выход фотосистемы II и содержание хлорофилла b.

Ключевые слова: низкоинтенсивное переменное магнитное поле, гипертермия, фотосинтетический аппарат, реакция Хилла, квантовый выход фотосистемы, фотосинтетические пигменты.

Фотосинтетический аппарат растений чувствителен к различным неблагоприятным факторам внешней среды, поэтому его показатели могут служить маркером изменений, происходящих в клетках растений. Имеются сообщения, что обработка слабым магнитным полем может иметь корректирующее послестрессовое воздействие, что заключается в восстановлении им физиологических процессов, нарушенных стрессовыми факторами. Показано, что предварительная обработка магнитным полем (0.45 мТл) ускоряла процесс развития всходов и увеличивала общее количество листьев *Cucumis sativus*, аналогичные результаты были также зарегистрированы у цветной капусты и томатов [1–3]. Саженьцы огурцов, предварительно обработанные магнитным полем, прорастали лучше, чем необработанные, и их надземная биомасса значительно увеличивалась. Этот эффект был показан на других садоводческих видах, обработанных магнитным полем, например клубнике, ячмене, пшенице [3].

Несмотря на достаточно объемное количество показательных результатов влияния магнитных полей на живые объекты, окончательный механизм воздействия остается до конца не ясным. На данный момент существует несколько гипотез, описывающих возможные принципы воздействия [4–7], но единой концепции механизмов развития эффектов магнитного поля в живых организмах не существует. В связи с этим, исследовано влияние низкоинтенсивного переменного магнитного поля, хронической и

острой гипертермии на функциональное состояние фотосинтетического аппарата растений гороха.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования служили 2-недельные растения гороха *Pisum sativum* L. сорта «Альбумен», выращенные в лабораторных условиях при нормальной (23°C) и повышенной (27°C, хроническая гипертермия (ХГ)) температуре. Часть растений, выращенных при нормальной температуре, подвергалась воздействию магнитного поля (МП) в течение 30 мин, острой гипертермии (ОГ) (42°C) в течение 30 мин; другая часть – последовательно ОГ (30 мин) и магнитного поля (30 мин); еще одна группа растений после обработки ОГ находилась в течение 30 мин в условиях нормального геомагнитного поля и нормальной температуры. Для генерации магнитного поля использовалась магнитотерапевтическая установка VL-2 (*ElectroBiology Inc.*, США), создававшая импульсное низкоинтенсивное магнитное поле со значением магнитной индукции 1.5 мТл, частотой магнитного поля в соленоиде 15 Гц. Контролем служили растения, выдержанные в условиях нормального геомагнитного поля и нормальной температуры. Были исследованы квантовый выход фотосистем I и II, скорость фотосинтеза по реакции Хилла, пигментный состав листьев растений (хлорофиллы a и b, каротиноиды).

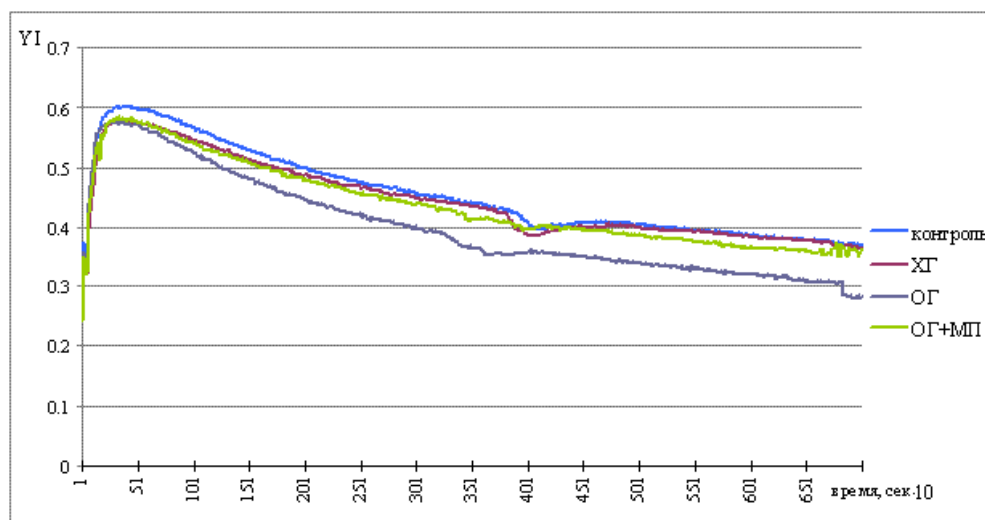


Рис. 1. Влияние хронической гипертермии (ХГ), острой гипертермии (ОГ) и последовательной обработки острой гипертермией и магнитным полем (ОГ+МП) на квантовый выход ФС I (YI)

Определение квантового выхода фотосистем производили с помощью РАМ-флуометрии на DUAL-РАМ-100 (*Heinz Walz*, Германия). Скорость реакции Хилла определяли согласно [8] с изменениями: 2 г листьев растирали с 10 мл среды выделения (0.01 М трис-НСI в 0.35 М NaCl, $pH = 7.8$), центрифугировали 7 мин (1000 г, 4°C) для выделения фотосинтетически активных хлоропластов типа «с»; осадок ресуспензировали в 3.5 мл 0.035 М NaCl. 0.2 мл суспензии смешивали с 1.3 мл среды инкубации, содержащей KH_2PO_4 , $MgSO_4$, трис-НСI, $K_3Fe(CN)_6$, NaCl; половину пробирок выдерживали 10 мин в темноте, половину – на свету. Реакцию останавливали 1.5 мл 5% раствора трихлоруксусной (ТХУ) кислоты, содержимое фильтровали. Оптическую плотность фильтрата измеряли на спектрофотометре СФ-2000 при λ 420 нм. Скорость реакции Хилла рассчитывали в $\mu\text{моль } K_3Fe(CN)_6 \cdot \text{час}^{-1} \cdot (\text{мг хлорофилла})^{-1}$. Содержание пигментов определяли спектрофотометрически в 100% ацетоновой вытяжке с дальнейшим расчетом по формулам Веттштейна [8].

Результаты и их обсуждение

Эффективный квантовый выход фотосистем (ФС) показывает отношение квантов света, пошедших на фотохимические реакции, к общему числу поглощенных квантов. Данный показатель может изменяться под воздействием различных факторов внешней среды [9, 10]. ФС I осуществляет двухступенчатый, двухквантовый фотохимический процесс в фотосинтезе, участвуя как в циклическом, так и нециклическом потоках электронов. В ФС I происходит про-

цесс восстановления НАДФ. Фотосистема I оказалась чувствительной к острой гипертермии (рис. 1), причем магнитное поле оказывает корректирующее воздействие после острой гипертермии, что говорит о положительном влиянии низкоинтенсивных магнитных полей на фотофизические процессы. Фотосистема II обеспечивает основной – нециклический – поток электронов, осуществляет фотоокисление воды [9]. Квантовый выход ФС II после 30-минутного 42-градусного воздействия не снижался, что может свидетельствовать об устойчивости данного показателя к кратковременным стрессовым факторам, однако ФС II оказалась чувствительной к хронической гипертермии (рис. 2).

Как выращивание растений гороха в условиях хронической гипертермии, так и обработка растений кратковременной острой гипертермией приводили к снижению скорости реакции Хилла (рис. 3). Реакция Хилла представляет собой индуцируемый светом перенос электронов от воды к нефизиологическим окислителям (реагентам Хилла) против градиента химического потенциала. С помощью этой реакции судят об интенсивности фотосинтеза и общем состоянии фотосинтетического аппарата. МП само по себе не вызывало существенных изменений скорости реакции Хилла у растений, выращенных в нормальных условиях. Корректирующего эффекта магнитного поля после острой гипертермии также не обнаружено: скорость реакции Хилла оставалась пониженной. Возможно это связано со значительными стрессовыми изменениями в тканях растений, подвергнутых острой гипертермии, которые не могут быть скорректированы слабым магнитным полем. Снижение реакции Хилла говорит о по-

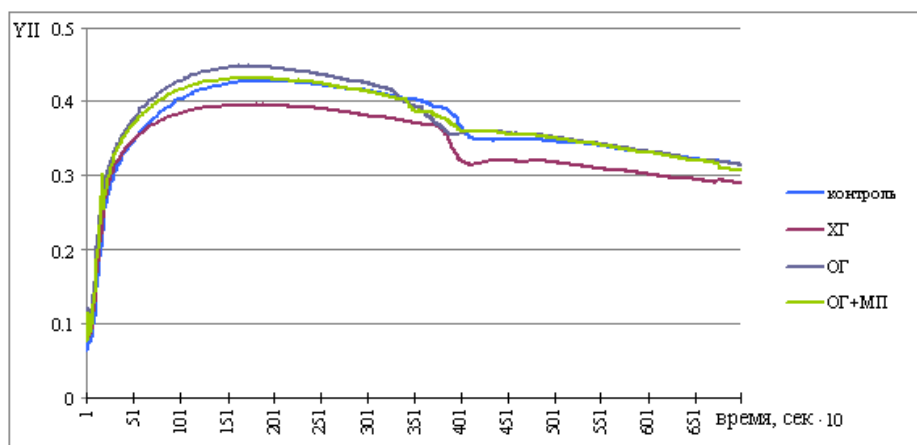


Рис. 2. Влияние хронической гипертермии, острой гипертермии и последовательной обработки острой гипертермией и магнитным полем на квантовый выход ФС II (YII)

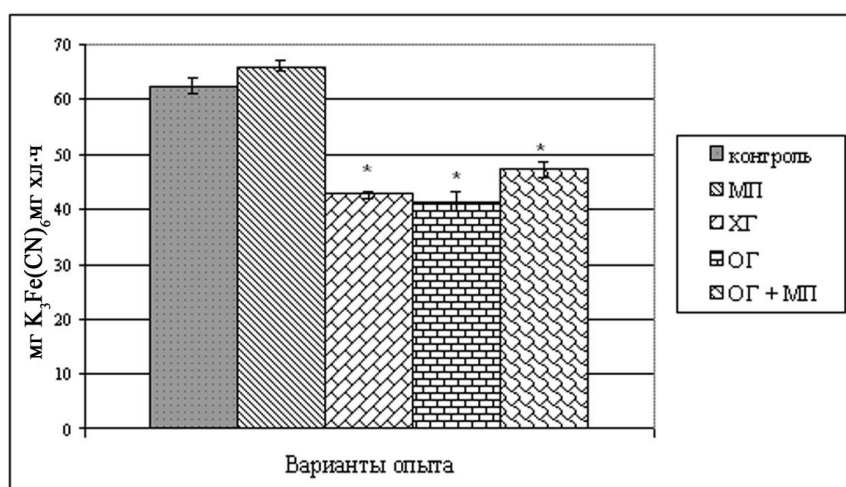


Рис. 3. Влияние воздействия магнитного поля хронической гипертермии, острой гипертермии и последовательной обработки острой гипертермией и магнитным полем на скорость реакции Хилла. * $p \leq 0.05$ относительно контроля

давлении фотосинтетической активности фотосистемы II на фотохимическом уровне, несмотря на ее устойчивость к данному фактору на фотофизическом уровне (квантовый выход).

Содержание хлорофилла а в пробе при всех обработках повышалось на 23–32%, концентрация хлорофилла b оставалась неизменной после обработки магнитным полем, но после воздействия острой гипертермии количество хлорофилла b повышалось (таблица). Экспозиция растений в магнитном поле после острой гипертермии приводила к нормализации содержания хлорофилла b. Хлорофилл b сконцентрирован, в основном, в ФС II, повышение его содержания может говорить о развитии стрессового ответа на гипертермическое воздействие. Соотношение хлорофиллов а и b увеличивалось после всех видов воздействия, что говорит об усилении роли ФС I в реакциях фотосинтеза, причем данный ответ оказался идентичным как на воз-

действие магнитного поля, так и на обработку острой гипертермией. Содержание каротиноидов значительно увеличивалось под воздействием всех обработок, что говорит о повышении адапционных механизмов в хлоропластах, так как каротиноиды выполняют фотопротекторную роль, защищая фотосинтетический аппарат от повреждений, вызванных неблагоприятными факторами. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что наблюдавшееся снижение скорости реакции Хилла не зависело от количества фотосинтетических пигментов.

Таким образом, происходило подавление фотосинтетической активности после воздействия на растения кратковременной острой гипертермии и при длительном их выращивании в условиях умеренной гипертермии. При обработке температурой 42°C и магнитным полем (как отдельно, так и последовательно) повы-

Таблица

Влияние воздействия магнитного поля (МП), острой гипертермии (ОГ) и последовательной обработки острой гипертермией и магнитным полем (ОГ+МП) на количество фотосинтетических пигментов

Варианты опыта	Содержание пигментов, мг/г сырого веса листьев			
	хлорофилл а	хлорофилл b	каротиноиды	хл. а /хл. b
Горох, выращенный при нормальной температуре – контроль	0.66±0.02	0.33±0.02	0.22±0.01	2.00
Горох, выращенный при нормальной температуре и обработанный МП	0.82±0.04*	0.33±0.02	0.42±0.03*	2.28
Горох, обработанный ОГ	0.81±0.04*	0.38±0.02*	0.36±0.04*	2,13
Горох, последовательно обработанный ОГ и МП	0.87±0.03*	0.36±0.01	0.46±0.02*	2.41

* $p \leq 0.05$ относительно контроля.

шалась роль фотосистемы I в процессе фотосинтеза. Увеличение уровня каротиноидов свидетельствует об усилении фотопротекторной защиты. Низкоинтенсивное магнитное поле не вызывало ожидаемого корректирующего воздействия на скорость реакции Хилла, однако поле с такими параметрами имело сходное с тепловым шоком воздействие на количество пигментов. Можно предположить, что предварительная обработка переменным магнитным полем перед острой гипертермией производит эффект закалки растений и препятствует развитию негативной реакции (снижение скорости фотосинтеза) на воздействие острой гипертермии.

Список литературы

1. Amaya J.M., Cabronell M.V., Martinez E., Raya A. Effect of stationary magnetic fields on germination and growth of seeds // *Horticult. Abs.* 1996. V. 68. P. 1363.
2. Samy C.G. Magnetic seed treatment I: influence on flowering, siliqua and seed characters of cauliflower. // *Orissa J. Hortic.* 1998. V. 26. P. 68–69.
3. Yao Yinan Li Yuan, Yang Yongqing, Li Chunyang. Effect of seed pretreatment by magnetic field on the sensitivity of cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings

to ultraviolet-B radiation // *Environmental and Experimental Botany.* 2005. V. 54. P. 286–294.

4. Аксенов С.И., Грунина Т.Ю., Горячев С.Н. Особенности влияния низкочастотного магнитного поля на набухание семян пшеницы на различных стадиях // *Биофизика.* 2001. Т. 46. Вып. 6. С. 1127–1132.
5. Белова Н.А., Леднев В.В. Активация и ингибирование гравитропической реакции в семенах льна при изменении величины магнитной индукции постоянного магнитного поля в пределах от 0 до 350 мТл // *Биофизика.* 2001. Т. 46. Вып. 1. С. 118–121.
6. Белова Н.А. Первичные мишени во взаимодействии слабых магнитных полей с биологическими системами // Автореферат дис. ... д-ра биол. наук. Пушкино, 2011. 47 с.
7. Бинги В.Н. Магнитобология. Эксперименты и модели. 2-е изд. М.: МИЛТА, 2002. 529 с.
8. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. Большой практикум по фотосинтезу / Под ред. И.П. Ермакова. М.: Изд. центр Академия, 2003. 256 с.
9. Корнеев Д.Ю. Информационные возможности метода индукции хлорофилла. Киев: Альтерпресс, 2002. 188 с.
10. Сысоева М.И., Лаврова В.В., Марковская Е.Ф., Матвеева Е.М., Шерудило Е.Г. Влияние ежесуточных кратковременных снижений температуры на состояние фотосинтетического аппарата растений картофеля в условиях заражения фитопаразитической нематодой // *Труды Карельского научного центра РАН.* 2010. № 2. С. 41–46.

THE INFLUENCE OF ACUTE AND CHRONIC HYPERTHERMIA AND LOW-INTENSITY ALTERNATING MAGNETIC FIELD ON *PISUM SATIVUM* L. PHOTOSYNTHETIC APPARATUS

Ya.V. Seredneva, A.S. Patunina, Yu.V. Sinitsyna. A.P. Veselov

The effects of acute and chronic hyperthermia, low-intensive magnetic field (15 Hz, 1.5 mT) on the state of the photosynthetic apparatus of *Pisum sativum* L. have been investigated. The acute and chronic hyperthermia is shown to inhibit photosynthetic activity. The magnetic field does not change the rate of the Hill reaction, however, it exerts a corrective influence on the quantum yield of photosystem II and chlorophyll b content.

Keywords: low-intensity alternating magnetic field, hyperthermia, photosynthetic apparatus, Hill reaction, quantum yield of photosystem, photosynthetic pigments.

References

1. Amaya J.M., Cabronell M.V., Martinez E., Raya A. Effect of stationary magnetic fields on germination and growth of seeds // *Horticult. Abs.* 1996. V. 68. P. 1363.
2. Samy C.G. Magnetic seed treatment I: influence on flowering, siliqua and seed characters of cauliflower. // *Orissa J. Hortic.* 1998. V. 26. P. 68–69.
3. Yao Yinan Li Yuan, Yang Yongqing, Li Chunyang. Effect of seed pretreatment by magnetic field on the sensitivity of cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings to ultraviolet-B radiation // *Environmental and Experimental Botany.* 2005. V. 54. P. 286–294.
4. Aksenov S.I., Grunina T.Ju., Gorjachev S.N. Osobennosti vlijanija nizkochastotnogo magnitnogo polja na nabuhanie semjan pshenicy na razlichnyh stadijah // *Biofizika.* 2001. T. 46. Vyp. 6. S. 1127–1132.
5. Belova N.A., Lednev V.V. Aktivacija i ingibirovanie gravitropicheskoj reakcii v semenah l'na pri izmenenii velichiny magnitnoj indukcii postojannogo magnitnogo polja v predelah ot 0 do 350 mTl // *Biofizika.* 2001. T. 46. Vyp. 1. S. 118–121.
6. Belova N.A. Pervichnye misheni vo vzaimo-dejstvii slabych magnitnyh polej s biologičeskiimi sistemami // *Avtoreferat diss. ... d-ra biol. nauk.* Pushhino, 2011. 47 s.
7. Bingi V.N. Magnitobologija. Jeksperimenty i modeli. 2-e izd. M.: MILTA, 2002. 529 s.
8. Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V. Bol'shoj praktikum po fotosintezu / Pod red. I.P. Ermakova / M.: Izd. centr Akademija, 2003. 256 s.
9. Korneev D.Ju. Informacionnye voz-mozhnosti metoda indukcii hlorofilla. Kiev: Al'terpress, 2002. 188 s.
10. Sysoeva M.I., Lavrova V.V., Markovskaja E.F., Matveeva E.M., Sherudilo E.G. Vlijanie ezhesutochnyh kratkovremennyh snizhenij temperatury na sostojanie fotosinteticheskogo apparata rastenij kartofelja v uslovijah zarazhenija fitopara-ziticheskoj nematodoj // *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN.* 2010. № 2. S. 41–46.