

ФОТОХИМИЧЕСКИЙ ИНДЕКС ОТРАЖЕНИЯ – КАК ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА СТРЕССОВЫХ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ОТВЕТОВ РАСТЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНОМ И СИСТЕМНОМ УРОВНЕ

В.С. Сухов, Е.М. Сухова, Е.Н. Громова, Л.М. Сурова, В.Н. Неруш, М.А. Гринберг,
В.А. Воденев

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Россия, vssuh@mail.ru

Аннотация. «Фотохимический индекс отражения» (photochemical reflectance index, PRI) отражает изменения в цикле ксантофиллов и, потенциально, может быть использован как показатель фотосинтетического стресса у растений. Мы исследовали влияние на PRI ряда неблагоприятных факторов, действующих на целое растение или локально. Показано, что в условиях стресса наблюдаются изменения PRI. Обсуждаются условия оптимального использования PRI для выявления стрессового ответа растения.

Ключевые слова: PRI, оптический мониторинг, фотосинтетический стресс, фотохимический индекс отражения

DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-749-751

Развитие современного сельского хозяйства и экологического мониторинга требует разработки новых методов оценки состояния растений, которые будут высокопроизводительными и дистанционными, а также, в будущем, могут быть автоматизированы. С этой точки зрения очень перспективными являются оптические методы мониторинга, включающие, в частности, анализ RGB-изображений, термографию, регистрацию флуоресценции и регистрацию различных спектральных индексов, которые рассчитываются на основании интенсивностей отраженного света на заданных длинах волн [Porcar-Castell et al., 2014; Mahlein, 2016]. Последнее направление является одним из наиболее перспективных; особенно при решении задачи мониторинга фотосинтетических процессов и продуктивности. Так, в настоящее время широко используется так называемый «вегетационный индекс» (normalized difference vegetation index, NDVI), отражающий объем фотосинтезирующей биомассы, и различные его модификации (enhanced vegetation index, EVI, optimised soil-adjusted vegetation index, OSAVI, и др.), индексы содержания хлорофиллов (normalized difference red edge index, NDRE, modified chlorophyll absorption in reflectance index, MCARI, transformed chlorophyll absorption in reflectance index, TCARI) и др. [Eitel et al., 2009].

Важно отметить, что большинство отмеченных спектральных индексов отражают достаточно медленные процессы (изменения количества фотосинтезирующей биомассы и/или содержания фотосинтетических пигментов), в то же время весьма важной задачей является раннее выявление изменений фотосинтетических процессов у растений и, в первую очередь, развития фотосинтетического стресса. В работах Gamon с соавторами [Gamon et al., 1992, 1997] был предложен и апробирован так называемый «фотохимический индекс отражения» (photochemical reflectance index, PRI), который опирается на возрастание поглощения на длине волны 531 нм в случае развития переходов виолоксантина в зеаксантин в ксантофилловом цикле. PRI рассчитывается как $\frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$, где R_{531} и R_{570} – интенсивности отраженного света на длине волны 531 и 570 нм [Zhang et al., 2016].

Потенциально, PRI должен хорошо отражать развитие нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ) и являться перспективным методом для быстрого и

дистанционного мониторинга развития растительного стресса под действием широкого спектра неблагоприятных факторов. В то же время данные об эффективности использования PRI в качестве показателя состояния растений достаточно противоречивы и проблема требует дальнейших исследований.

В настоящей работе мы провели анализ возможности использования PRI в качестве инструмента для выявления фотосинтетического стресса. Для этого использовали несколько подходов. Прежде всего, был проведен мета-анализ литературных данных по применению PRI для выявления факторов, влияющих на эффективность такого применения. Во-вторых, было исследовано влияние на PRI интенсивности и длительности освещения. В-третьих, было исследовано изменение показателей фотосинтеза и PRI в условиях действия повышенной температуры и засухи. Эксперименты проводились на растениях гороха, пшеницы и тыквы.

В ходе мета-анализа литературных данных было показано, что на эффективность использования PRI для выявления фотосинтетического стресса существенно влияют такие факторы как пространственный уровень регистрации, тип освещения и особенности распределения фотосинтетических показателей у растений.

Далее показано, что увеличение интенсивности освещения приводило к снижению PRI у всех трех видов исследованных растений. При построении диаграммы рассеивания между PRI и NPQ на базе всей совокупности экспериментальных точек коэффициент корреляции между ними был низким; однако при использовании Δ PRI (изменения PRI) корреляция становилась статистически значимой.

В ходе дополнительного анализа, проведенного на горохе, была исследована связь между PRI и NPQ на различных временных интервалах после начала освещения. Было показано, что корреляция между PRI и NPQ была минимальной по абсолютной величине сразу после начала освещения, после чего возрастала, что показывает влияние переходных процессов на силу связи между фотохимическим индексом отражения и нефотохимическим тушением флуоресценции, т.е. влияние изменения интенсивности освещения на эффективность использования PRI для мониторинга.

Следующая группа экспериментов была посвящена исследованию влияния на фотохимический индекс отражения кратковременного действия повышенной температуры (горох, пшеница, тыква) и длительной почвенной засухи (горох). Показано, что у исследованных растений происходит возрастание абсолютной величины Δ PRI, изменения PRI менее стабильны. В случае почвенной засухи также меняется, прежде всего, Δ PRI.

Финальная группа экспериментов была посвящена анализу влияния на PRI электрических сигналов, вызванных локальным ожогом другой части растения. Исследования проводили на горохе. Показано, что вызванные локальным ожогом переменные потенциалы вызывали обратимую инактивацию фотосинтеза; при этом наблюдался близкий по своим временным параметрам обратимый сдвиг PRI.

В целом, полученные результаты показывают, что фотохимический индекс отражения действительно может показывать развитие фотосинтетического стресса, вызванного избыточным освещением, повышенной температурой, засухой или распространением стрессовых сигналов электрической природы. В то же время наиболее эффективным показателем фотосинтетического стресса является не величина PRI, а величина его изменения. Кроме того, эффективность использования PRI может зависеть от режима освещения растений; в частности, от временных параметров изменений интенсивности света.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-76-20032).

Литература

Eitel J., Long D., Gessler P.E., Hunt E.R., Brown D.J. Sensitivity of ground-based remote sensing estimates of wheat chlorophyll content to variation in soil reflectance // Soil Science Society of America Journal. – 2009. – V. 73. – P. 1715–1723.

Mahlein A.-K. Plant disease detection by imaging sensors – Parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping // Plant Disease. – 2016. – V. 100. – P. 241–251.

Porcar-Castell A., Tyystjärvi E., Atherton J., van der Tol C., Flexas J., Pfündel E.E., Moreno J., Frankenberg C., Berry J.A. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges // Journal of Experimental Botany. – 2014. – V. 65. – P. 4065–4095.

Gamon J.A., Peñuelas J., Field C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency // Remote Sensing of Environment. – 1992. – V. 41. – P. 35–44.

Gamon J.A., Serrano L., Surfus J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels // Oecologia. – 1997. – V. 112. – P. 492–501.

Zhang C., Filella I., Garbulsky M.F., Peñuelas J. Affecting factors and recent improvements of the photochemical reflectance index (PRI) for remotely sensing foliar, canopy and ecosystemic radiation-use efficiencies // Remote Sensing. – 2016 – V. 8. – Article 677.

A PHOTOCHEMICAL REFLECTANCE INDEX AS TOOL OF MONITORING OF PHOTOSYNTHETIC STRESS RESPONSES IN PLANTS ON LOCAL AND SYSTEMIC LEVEL

V.S. Sukhov, E.M. Sukhova, E.N. Gromova, L.M. Surova, V.N. Nerush, M.A. Grinberg, V.A. Vodeneev

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia, vssuh@mail.ru

Abstract. A photochemical reflectance index (PRI) shows changes in xanthophylls cycle and, potentially, can be used as indicator of photosynthetic stress in plants. We investigated influence of local and systemic action of stressors on PRI. It was shown that stressors induced changes in PRI. Conditions of using of PRI for monitoring of plant stress responses were discussed.

Keywords: *optical monitoring, photosynthetic stress, photochemical reflectance index, PR*