

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ НЕФОТОХИМИЧЕСКОГО ТУШЕНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛИСТА

Е.М. Сухова, В.С. Сухов

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

**Аннотация.** При адаптации растений к действию стрессоров происходит изменение активности метаболических процессов, включая фотосинтез. Основной показатель фотосинтетического стресса – это нефотохимическое тушение хлорофилла. Моделирование развития нефотохимического тушения представляет большой интерес для изучения механизма действия стрессоров. Нами была разработана модель световой зависимости активности нефотохимического тушения. Использование ее является перспективным для создания оптической модели листа.

**Ключевые слова:** нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла, математическое моделирование, фотосинтез, световое воздействие

**DOI:** 10.31255/978-5-94797-319-8-752-754

Адаптация к действию стрессоров является необходимым условием для выживания растений. При этом происходят перестройки метаболизма, включая такие ранние ответы, как усиление дыхания, изменения транспирации, изменение активности фотосинтетических процессов и т.д. При этом фотосинтез, являясь ключевым метаболическим процессом растений, очень чувствителен к действию различных стрессоров, одним из которых наиболее важным является свет [Ruban, 2016]. Известно, что световая энергия необходима для синтеза сахаров в процессе фотосинтеза. Однако чрезмерное ее количество может привести к повреждению фотосинтетического аппарата и генерации активных форм кислорода [Ruban, 2016], разрушающих клеточные структуры [Sewelam et al., 2016]. Одним из механизмов, способным это предотвратить, является нефотохимическое тушение флуоресценции хлорофилла, включающее взаимодействие зеаксантина и протонированного PsbS белка с реакционным центром, а также перемещение светособирающей антенны между фотосистемами II и I, фотоингибирование [Jahns et al., 2009; Jajoo et al., 2014; Ruban, 2016]. Моделирование нефотохимического тушения представляет большой интерес для изучения механизма действия стрессоров [Zaks et al., 2012; Atherton et al., 2016; Matuszyńska et al., 2016].

Мы провели экспериментальный анализ динамики нефотохимического тушения и при различных уровнях освещения на листе гороха посевного. Динамика флуоресценция хлорофилла измерялась с помощью Dual-PAM-100. Лист гороха адаптировали в темноте в течение 10 минут. После этого анализировалась динамика коэффициента нефотохимического тушения ( $q_N$ ) при фоновом освещении, а также при интенсивности красного актиничного света (635 нм) 131, 344, 830, 1599 мкМ м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Для каждой интенсивности  $q_N$  измерялось раз в минуту в течение 5 минут, после чего актиничный свет выключался на 2 минуты, а затем включался актиничный свет с большей интенсивностью. Было показано, что с увеличением интенсивности актиничного света максимальное значение  $q_N$  увеличивалось, и его релаксация замедлялась. Также было обнаружено, что при выключении актиничного света значения нефотохимического тушения возвращались практически к стационарному уровню.

Далее мы фитировали полученные динамики изменения  $qN$  при различном освещении, используя предложенное нами кинетическое описание развития нефотохимического тушения и его релаксации, включающее две светозависимые компоненты нефотохимического тушения. Экспериментальные и модельные кривые хорошо соответствовали друг другу. Рассчитанные кривые показывали увеличение  $qN$  при включении света и возврат к стационарному состоянию при выключении света.

Таким образом, полученная модель описывает световую зависимость нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла. Перспективным направлением развития модели является описание распределения нефотохимического тушения по толщине листа, что позволит оценить подверженность листа стрессу. Такая оценка вызывает трудности при использовании существующих моделей фотосинтетической активности, описывающих распределение потока электронов [Buckley, Farquhar 2004; Evans, 2009], поглощения углекислого газа [Ho et al., 2016] внутри листа.

*Экспериментальные исследования были выполнены при поддержке Российского научного фонда (Проект №17-76-20032), анализ математической модели был выполнен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект № 18-34-00644 мол\_а).*

#### Литература

Atherton J., Nichol C.J., Porcar-Castell A. Using spectral chlorophyll fluorescence and the photochemical reflectance index to predict physiological dynamics // *Remote Sens. Environ.* – 2016. – V. 176. – P. 17–30.

Buckley T.N., Farquhar G.D. A new analytical model for whole-leaf potential electron transport rate // *Plant Cell Environ.* – 2004. – V. 27. – P. 1487–1502.

Evans J.R. Potential errors in electron transport rates calculated from chlorophyll fluorescence as revealed by a multilayer leaf model // *Plant Cell Physiol.* – 2009. – V. 50. – P. 698–706.

Ho Q.T., Berghuijs H.N., Watté R., Verboven P., Herremans E., Yin X., Retta M.A., Aernouts B., Saeys W., Helfen L., Farquhar G.D., Struik P.C., Nicolai B.M. Three-dimensional microscale modelling of CO<sub>2</sub> transport and light propagation in tomato leaves enlightens photosynthesis // *Plant Cell Environ.* – 2016. – V. 39. – P. 50–61.

Jahns P., Latowski D., Strzalka K. Mechanism and regulation of the violaxanthin cycle: The role of antenna proteins and membrane lipids // *Biochim. Biophys. Acta.* – 2009. – V. 1787. – P. 3–14.

Jajoo A., Mekala N.R., Tongra T., Tiwari A., Grieco M., Tikkanen M., Aro E.-M. Low pH-induced regulation of excitation energy between the two photosystems // *FEBS Lett.* – 2014. – V. 588. – P. 970–974.

Matuszyńska A., Heidari S., Jahns P., Ebenhöf O. A mathematical model of non-photochemical quenching to study short-term light memory in plants // *Biochim. Biophys. Acta.* – 2016. – V. 1857. – P. 1860–1869.

Ruban A.V. Nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching: mechanism and effectiveness in protecting plants from photodamage // *Plant Physiol.* – 2016. – V. 170. – P. 1903–1916.

Sewelam N., Kazan K., Schenk P.M. Global plant stress signaling: reactive oxygen species at the cross-road // *Front Plant Sci.* – 2016. – V. 7. – P. 187.

Zaks J., Amarnath K., Kramer D.M., Niyogi K.K., Fleming G.R. A kinetic model of rapidly reversible nonphotochemical quenching // *PNAS.* – 2012. – V. 109. – P. 15757–15762.

**A MATHEMATICAL MODEL OF LIGHT DEPENDENCE OF  
NONPHOTOCHEMICAL QUENCHING OF CHLOROPHYLL FLUORESCENCE  
AND ITS PERSPECTIVES FOR DEVELOPMENT OF OPTICAL LEAF MODEL**

E.M. Sukhova, V.S. Sukhov

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia, *n.catherine@inbox.ru*

**Abstract.** Under stress conditions plants change activity of metabolic processes, including photosynthesis. The main indicator of photosynthetic stress is the nonphotochemical quenching of increase of chlorophyll fluorescence. The simulation of dynamic of nonphotochemical quenching is interesting for investigation of mechanisms of influence of stressors. We developed mathematical model of light dependence of nonphotochemical quenching. Using of this model is perspective for development of optical model of leaf.

**Keywords:** *nonphotochemical quenching, mathematical simulation, photosynthesis, light influence*