

УДК 535

## ВЛИЯНИЕ ДЛИННОПЕРИОДИЧЕСКОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ В СТРУКТУРЕ РАСТЕНИЙ НА ПЕРВИЧНЫЕ СТАДИИ ФОТОСИНТЕЗА

© 2018 г. М. А. Коршунов<sup>1,\*</sup>, А. В. Шабанов<sup>1</sup>, Е. Р. Буханов<sup>2</sup>,  
академик РАН В. Ф. Шабанов<sup>1,2</sup>

Поступило 14.08.2017 г.

С использованием структурных данных о листьях растений методом трансфер-матриц выявлены особенности распространения света в биофотонно-кристаллических структурах. Обнаружено расщепление стоп-зоны на две. Вычислена плотность фотонных состояний и величина электромагнитного поля. Объяснено возникновение двух фотосистем (разделение стоп-зоны на две), особенность длинноволнового квантового выхода, его усиление (эффект Эмерсона), диссоциация воды в мягком режиме из-за возрастания на слоях электромагнитного поля.

DOI: 10.7868/S0869565218030064

Фотосинтез с момента его открытия всегда был под пристальным вниманием исследователей [1–3] из-за уникальной способности растений, водорослей, цианобактерий преобразовывать энергию света в химические соединения. С развитием экспериментальных методов радикально изменились представления о механизмах этого процесса [4]. Принято различать три стадии фотосинтеза: 1) поглощение света; 2) превращение энергии света в электростатическую энергию разделённых зарядов протонов и электронов, которые образуются при расщеплении воды; эта энергия превращается в энергию химических связей органических веществ, образующихся в растениях, при этом, в частности, образуются молекулы аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ); 3) конверсия  $\text{CO}_2$  в углеводы.

Согласно современным представлениям [4, 5] процесс фотосинтеза происходит в фотосистемах 1 и 2.

Пигментный комплекс, состоящий из молекул хлорофилла (а и b) белков, каротиноидов, фикобилинов, действует как система, поглощающая энергию света, и передаёт её в реакционный центр. При этом для производства одной молекулы кислорода по разным источникам [4] требуется от 300 до 5000 молекул хлорофилла. До сих пор идут дискуссии

о строении этих комплексов и механизмов передачи энергии возбуждения.

Интересна особенность зависимости квантового выхода (который показывает отношение поглощённых квантов света к выделившемуся количеству кислорода) от длины волны. В области длин волн больше 685 нм наблюдается его резкое падение, хотя хлорофилл ещё поглощает в той области. Это явление называется красным падением. При освещении двумя волнами в области 700 и 650 нм эффективность фотосинтеза возрастает (эффект Эмерсона) [2]. Природа этого явления не получила общепризнанного теоретического обоснования. Не установлена связь между структурой растений и оптическими свойствами.

В листьях растений обнаружена длиннопериодическая упорядоченность структурных элементов, представляющих собой слои с различными диэлектрическими проницаемостями [6, 7].

В литературе принято называть такие структуры фотонно-кристаллическими, применительно к биологическим объектам – биофотонно-кристаллическими. В последнем случае упорядоченность носит скрытый характер [7]. В подобных структурах спектр электромагнитных волн имеет зонный характер. Наличие фотонных зон (стоп-зон) дает возможность управлять скоростью оптического излучения атомов и молекул [8]. На краях стоп-зоны отмечается увеличение электромагнитного поля в несколько раз [9]. При этом структура может содержать дефекты, нарушающие периодичность фотонно-кристаллической структуры, что приводит к возникновению

<sup>1</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Красноярск

<sup>2</sup>Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской Академии наук  
\*E-mail: kors@iph.krasn.ru



На рис. 2(1) показан расчётный спектр бездефектной структуры (рис. 1) с параметрами, взятыми из работы [11]. При этом можно отметить, что в природных объектах показатели преломления имеют низкий контраст [12]. Тем не менее спектр электромагнитных волн имеет зонный характер. Плотность фотонных состояний  $\rho(\lambda)$  для этой структуры (рис. 2(2)) повышается на краях стоп-зоны.

Как видно из рис. 2(1), излучение атомов или молекул в диапазоне длин волн 460–560 нм затруднено, поскольку молекулы, возбуждённые светом длиной волны  $\sim 460$  нм, флуоресцируют в соответствии с правилом Стокса на более длинных волнах, попадающих в стоп-зону. Кроме того, в стоп-зону попадают линии поглощения хлорофиллов а и b. В таких случаях происходит сильное взаимодействие между экситонным и брэгговским резонансами [13].

Результаты расчёта с учётом спектра поглощения хлорофиллов представлены на рис. 2(3). Из сравнения рис. 2(1) и 2(3) видны произошедшие изменения стоп-зоны: она расширилась, и появились дополнительные моды, которые обусловлены наличием дефектов в структуре. Плотность фотонных состояний (рис. 2(4)) в этом случае больше, чем плотности фотонных состояний упорядоченной структуры (рис. 2(2)).

Вся стоп-зона разделена на две части (*de* и *fp*). Красное падение квантового выхода обусловлено уменьшением в этой области длин волн (*e'o*) плотности фотонных состояний (рис. 2(4)). Из этого рисунка также понятна причина усиления Эмерсона. При облучении молекул длиной волны в области (*ef*) возбуждённые фотоны из (*fp*) перебрасываются в часть зоны (*de*). При этом увеличивается квантовый выход фотосинтеза в красной области спектра.

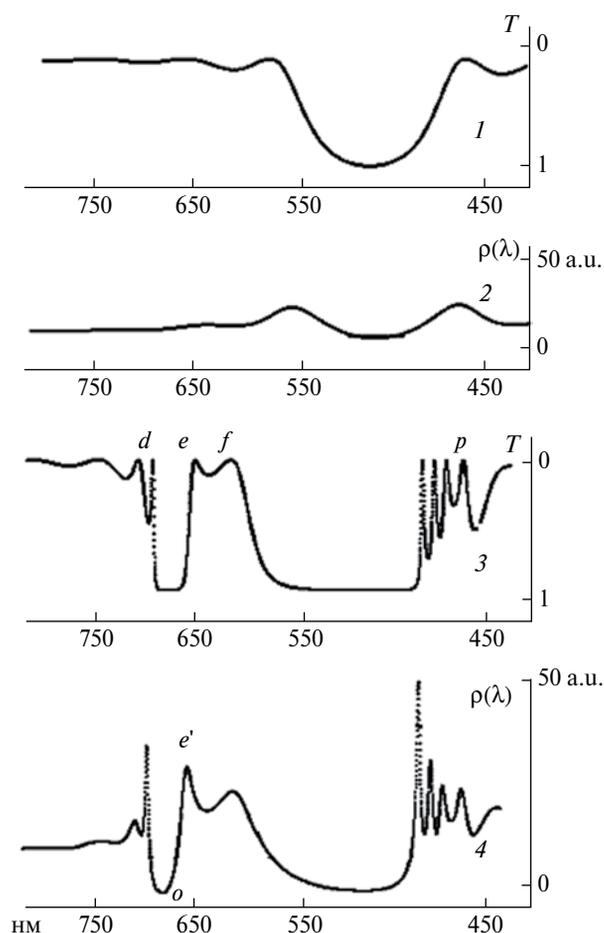
На рис. 3 представлена зависимость максимума электромагнитного поля от частоты на центральном слое для упорядоченной структуры (1) (рис. 2(1)) и структуры с учётом линий поглощения хлорофиллов b (2) (рис. 2(3)), откуда видно возрастание электромагнитного поля на краях стоп-зон.

Таким образом, полученные результаты расчётов оптических свойств длиннопериодических растительных структур позволяют в рамках единого подхода объяснить особенности первичных стадий фотосинтеза, а именно:

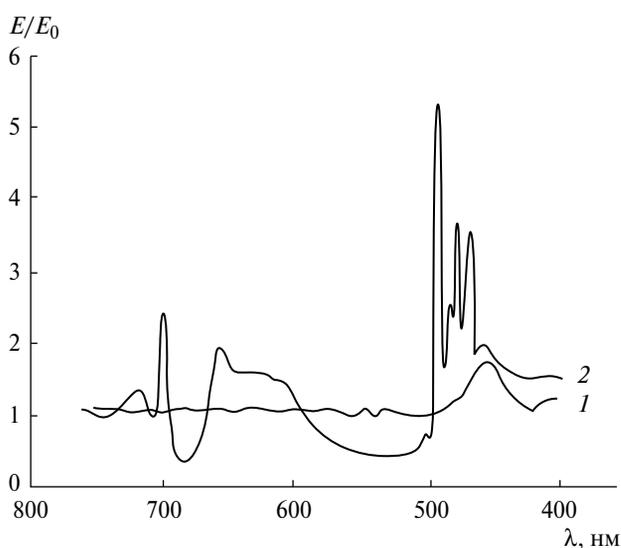
появление стоп-зон;

возникновение двух фотосистем (разделение стоп-зоны на две);

особенность длинноволнового квантового выхода—ослабление его при облучении светом



**Рис. 2.** Спектр пропускания бездефектной структуры (1) (рис. 1) и плотность фотонных состояний  $\rho(\lambda)$  (2); спектр пропускания структуры с учётом линий поглощения хлорофиллов b (3) и плотность фотонных состояний  $\rho(\lambda)$  (4).



**Рис. 3.** Зависимость максимума электромагнитного поля от частоты на центральном слое для упорядоченной структуры (1) (рис. 2(1)) и структуры с учётом линий поглощения хлорофиллов b (2) (рис. 2(3)).

в области 685–710 нм и его усиление при дополнительном облучении в области 650 нм (эффект Эмерсона);

диссоциация воды в мягком режиме из-за возрастания на слоях электромагнитного поля.

Кроме того, наши результаты поясняют механизм смещения красной границы разложения воды в сторону длинных волн в квазиупорядоченных структурах [14] по сравнению со структурами с малым периодом и уменьшение напряжения, необходимого для диссоциации воды в хлоропластах при их освещении [15].

Полученные результаты согласуются с хемисмотической теорией Митчела [2] о механизмах преобразования энергии в биологических мембранах. Запасание энергии в АТФ происходит вследствие предварительного накопления зарядов на стенках мембраны. Разность электрохимического потенциала ионов водорода на сопрягающих мембранах (внутренних мембранах митохондрий, тилакоидов, хлоропластах) возникает за счёт поглощённых квантов света.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимирязев К.А.* Избранные сочинения. Т. 1. Солнце, жизнь и хлорофилл. М.: Гос. изд-во сель.-хоз. лит., 1948. 696 с.
2. *Холл Д., Пао К.* Фотосинтез. М.: Мир, 1983. 132 с.
3. *Скулачев В.П.* Энергетика биологических мембран. М.: Наука, 1989. 564 с.
4. *Mirkovic T., Ostroumov E.E., Anna J.M., et al.* // *Chem. Rev.* 2017. V. 117. № 2. P. 249–293.
5. *Mazor Y., Borovikova A., Caspy I., Nelson N.* // *Nature Plants.* 2017. V. 3. 17014. P. 1–9.
6. *Vignolini S., Moyroud E., Glover B.J., et al.* // *J. Roy. Soc. Interface.* 2013. V. 10 (87). 20130394. P. 1–9.
7. *Jacobs M.* // *Nature Plants.* 2016. V. 24. 16162. P. 1–6.
8. *Быков В.П.* // *Квантовая электроника.* 1975. Т. 4. С. 861–866.
9. *Горелик В.С.* // *ЖЭТФ.* 2016. Т. 150. В. 3 (9). С. 435–444.
10. *Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В.* Оптика реальных фотонных кристаллов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 209 с.
11. *Kirchhoff H.* // *Proc. Nat. Acad. USA.* 2011. V. 108. № 50. P. 20249–20253.
12. *Paillotin G.* // *Biophys. J.* 1998. V. 75. P. 124–133.
13. *Казанов Д.Р., Пошакинский А.В., Шубина Т.В.* // *Письма ЖЭТФ.* 2017. Т. 105. В. 1. С. 10–14.
14. *Карнов С.В., Слабко В.В.* Оптические и фотофизические свойства фрактально-структурированных золей металлов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 265 с.
15. *Pinhassi R.* // *Nature Communs.* 2015. 12552. P. 1–10.