

МГУ имени М.В. Ломоносова

Отдел фотосинтеза и флуоресцентных методов исследований

№ госрегистрации
AAAA-A17-117120540072-4

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан

«__» _____ Г.

УДК
577.355 Биофизика фотосинтеза

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Структура и функция биологических мембран. Биоэнергетика. Фотосинтез.
по теме:

Физические механизмы и наноразмерные структурные компоненты
высокоэффективного преобразования световой энергии при фотосинтезе
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе

«__» _____ Г.

Руководитель темы
Разживин А.П.

«__» _____ Г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:
заведующий отделом, доктор _____ (Разживин А.П.)
физико-математических наук

Исполнители темы:

ведущий специалист	_____ (Заднепрянец Л.И.)
инженер 2-ой категории	_____ (Козлова Т.Б.)
научный сотрудник, кандидат	_____ (Козловский В.С.)
физико-математических наук	
ведущий научный сотрудник,	_____ (Котова Е.А.)
кандидат биологических наук	
ведущий научный со-	_____ (Новодережкин В.И.)
трудник, доктор физико-	
математических наук	
старший научный сотрудник,	_____ (Таисова А.С.)
кандидат биологических наук	
ведущий специалист	_____ (Унгуриян П.И.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

лазерная фемтосекундная спектроскопия, экситоны, светособирающие комплексы, перенос энергии возбуждения, хлорофилл, реакционный центр, бактериальный фотосинтез

Ключевые слова по-английски:

laser femtosecond spectroscopy, chlorophyll, bacterial photosynthesis, excitons, light-harvesting complexes, excitation energy transfer, reaction center

В 2020 году сотрудниками отдела фотосинтеза и флуоресцентных методов исследований НИИ ФХБ МГУ были продолжены исследования процессов переноса энергии электронного возбуждения по светособирающей антенне фотосинтезирующих организмов и захвата этой энергии реакционными центрами. Основное внимание было уделено роли длинноволновых («красных» или «зацентровых») хлорофиллов излучения в антенных комплексах Lhca4 фотосистемы I (ФС-I) и CP29 растений, а также в прицентральной антенне ФС-I из цианобактерии *Arthrospira platensis*. Обсуждаются природа и возможная роль «красных» хлорофиллов в процессах переноса и захвата энергии возбуждения в фотосинтетических антеннах.

ВВЕДЕНИЕ

Данная научно-исследовательская работа посвящена выяснению физических механизмов и химических структур высокоэффективного преобразования энергии света при фотосинтезе. В 2020 году основное внимание было уделено длинноволновым («красным» или «зацентрированным») хлорофиллам в антенных комплексах Lhca4 фотосистемы I (ФС-I) и CP29 растений, а также в прицентральной антенне ФС-I из цианобактерии *Arthrospira platensis*. Природа и возможная роль «красных» хлорофиллов в процессах переноса и захвата энергии возбуждения в фотосинтетических антеннах до сих пор остаются не ясными.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В 2020 году сотрудниками отдела фотосинтеза и флуоресцентных методов исследований НИИ ФХБ МГУ были продолжены исследования процессов переноса энергии электронного возбуждения по светособирающей антенне фотосинтезирующих организмов и захвата этой энергии реакционными центрами. Основное внимание было уделено роли длинноволновых («красных» или «зацентрированных») хлорофиллов [1-3], которые характеризуются сильно смещенными в красную область и уширенными полосами поглощения и излучения. Смешивание состояния с переносом заряда (СТ-состояния) с многообразием возбужденных состояний, вызывающее эти так называемые красные формы, приводит к очень сложной кинетике многокомпонентного переноса энергии возбуждений внутри антенный комплекс Lhca4 фотосистемы I (ФС-I) растений [1]. Перенос энергии возбуждений в направлении СТ-состояния происходит в трех временных масштабах: быстро от красного Хл (в пределах 1 пс), медленнее (5-7 пс) со стороны Хл стро-мы и очень медленно (100 -200 пс) из недавно открытой люминальной ловушки с длиной волны 690 нм. На основе экспериментальных данных для Lhca4 и ранее представленной экситонной модели Редфилда-Фёрстера этого комплекса показана схема уравнивания объемных возбуждений с динамически локализованным СТ-состоянием на стромальной стороне. Другими словами, представлена полная картина путей передачи энергии, ведущих к заселению конечной ловушки (СТ-состояния) внутри всего комплекса Lhca4. Предполагается, что одна из ролей СТ-состояний состоит в регулировании переноса энергии возбуждений от периферийной антенны к ядру ФС-I. На основе объединенных данных линейной спектроскопии и спектроскопии одиночных молекул (SMS) для ФС-I из *Arthrospira platensis*, было выполнено квантовое моделирование оптического отклика на базе теории молекулярных экситонов и модели многомодового броуновского осциллятора [2]. Применяя эту модель, удалось рассчитать спектры красного состояния антенны с учетом индивидуальной настройки для каждого красного состояния низкочастотных вибронных мод. В рамках данной модели экситонов ФС-I было показано, что энергия связи между антенными хлорофиллами не может быть фактором образования красных состояний, поэтому длинноволновые полосы рассчитываются без отнесения к так называемым антенным красным хлорофиллам. Подгоняя факторы Хуанга – Риса и частоты для низших вибронных мод, удается воспроизвести эффекты сильной и слабой электрон-фононной связи, экспериментально наблюдаемые в спектрах SMS состояний красной антенны. Основываясь на выполненных теоретических расчетах, а также на анализе существующих кристаллических структур ФС-I цианобактерий, высказано предположение, что длинноволновые хлорофиллы могут быть локализованы в периферических белковых субъединицах, содержащих одну или две молекулы пигмента. На примере комплекса CP29 показано [3], что хотя все ССК растений и зеленых водорослей очень гомологичны по своей структуре и обладают множеством общих черт, каждый комплекс имеет свое место и задачу в процессе переноса энергии. Применение синергетического подхода, сочетающего стационарную и сверхбыструю спектроскопию, мутационный анализ и моделирование возбужденных состояний, позволяет раскрыть энергетический ландшафт хлорофиллов, связанных с этим комплексом. Удалось установить, что,

несмотря на общую высококонсервативную экситонную структуру, очень похожую на структуру других ССК, комплекс CP29 имеет дополнительный концевой эмиттерный домен. Одновременное присутствие двух низкоэнергетических участков, обращенных к периферийным антеннам и прицентральной антенне, позволяет CP29 эффективно работать проводником в потоке энергии. Результаты показывают, что хотя ССК имеют общую устойчивую архитектуру, но их структура точно подстраивается для выполнения определенных функций. Обзор работ, посвященных первичным процессам миграции энергии поглощенного солнечного света в антенных комплексах фотосинтеза, представлен в [4]. Анализируются многочисленные данные по переносу энергии в светособирающих комплексах высших растений, водорослей и ряда фотосинтезирующих бактерий. Рассмотрены основные теоретические подходы, моделирующие перенос энергии возбуждения в молекулярных агрегатах. На примере когерентных явлений, сопровождающих перенос энергии в природном фотосинтезе, обсуждается фундаментальная связь между квантовым микромиром и миром живых организмов. В работе [5] представлена отредактированная версия «Прощальной дискуссии» покойного Александра Юрьевича Борисова (1930-2019) по некоторым аспектам, связанным с передачей энергии возбуждения в фотосинтезирующих бактериях. Разработана программа для расчета радиуса миграции по механизму Фёрстера [6].

[1] Tros M., Novoderezhkin V.I., Croce R., van Grondelle R., Romero E. / Complete mapping of energy transfer pathways in the plant light-harvesting complex Lhca4 // PHYSICAL CHEMISTRY CHEMICAL PHYSICS. – 2020. – Vol. 22, no. 44. – P. 25720-25729. [2] Pishchalnikov R. Y., Shubin V. V., Razjivin A. P. The role of vibronic modes in formation of red antenna states of cyanobacterial psi // Photosynthesis Research. — 2020. — Vol. 146. — P. 75-86. [3] V. Mascoli, V. Novoderezhkin, N. Liguori et al. / Design principles of solar light harvesting in plants: Functional architecture of the monomeric antenna cp29 // Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics. — 2020. — Vol. 1861, no. 3. — P. 148156. [4] Яковлев А. Г., Тайсова А. С., Фетисова З. Г. ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В СВЕТОСОБИРАЮЩИХ АППАРАТАХ ПРИРОДНОГО ФОТОСИНТЕЗА // Успехи современной биологии. — 2020. — Т. 140, № 2. — С. 166-182. [5] Govindjee, Razjivin A. P., Kozlovsky V. S. Historical perspective. unique features of the 'photoenergetics' of purple bacteria: A critical survey by the late aleksandr yuryevich borisov (1930-2019) // Photosynthesis Research. — 2020. — Vol. 146, no. 1-3. — P. 17-24. [6] Козловский В.С., Разживин А.П. Расчет радиуса миграции Фёрстера // Свидетельство о регистрации прав на ПО..., № 2020663283 от 26 октября 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2020 году сотрудниками отдела фотосинтеза и флуоресцентных методов исследований НИИ ФХБ МГУ получены важные результаты характеризующие природу и роль длинноволновых («красных» или «зацентрированных») форм хлорофиллов в антенном комплексе Lhca4 фотосистемы I и комплексе CP29 растений, а также в прицентральной антенне фотосистемы I цианобактерии *Arthrospira platensis*. Представлена полная картина путей передачи энергии, ведущих к заселению конечной ловушки (СТ-состояния) внутри всего комплекса Lhca4. Высказано предположение, что длинноволновые хлорофиллы могут быть локализованы в периферических белковых субъединицах прицентральной антенны фотосистемы I цианобактерий, содержащих одну или две молекулы пигмента. На примере CP29 показано, что хотя светособирающие комплексы имеют общую устойчивую архитектуру, но их структура точно подстраивается для выполнения определенных функций.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2020 году
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами