

РОЛЬ КОГЕРЕНТНОСТИ В ЯВЛЕНИЯХ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНА В ПРИРОДНЫХ БИОХИМИЧЕСКИХ НАНОСИСТЕМАХ

В. В. Еремин, И. О. Глебов, В. В. Поддубный

Химический факультет, Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

vadim@educ.chem.msu.ru, glebov_io@mail.ru, vvpoddubnyy@gmail.com

PACS 87.15.ht

Рассмотрено влияние оптической когерентности и колебательной диссипации в белковое окружение на эффективность переноса электрона в реакционном центре пурпурных бактерий. Для электронных состояний донора и акцептора электрона использована модель одномерных гармонических осцилляторов; колебательная динамика в диссипативной среде описана в рамках теории Редфилда. Показано, что усредненная по времени эффективность переноса электрона практически не зависит от степени когерентности исходного состояния, поскольку когерентность увеличивает вероятность как прямого, так и обратного процесса. В то же время, эффективность переноса электрона тем больше, чем сильнее взаимодействие конечного состояния с белком. Этот результат показывает, что путем тонко настроенной диссипации белковое окружение может увеличивать эффективность квантового транспорта (переноса) в биохимических системах.

Ключевые слова: когерентность, фотосинтез, реакционный центр, диссипация, релаксация, перенос электрона, теория Редфилда, пурпурные бактерии.

1. Когерентность в биохимических наносистемах

Широко известна фраза: «Природа — лучший нанотехнолог» (см., например, [1]). Эта фраза на первый взгляд является попыткой притянуть всю молекулярную биологию и большую часть биофизики в сферу нанотехнологий. С другой стороны, в ней есть глубокое содержание: она говорит о том, что все молекулярные и супрамолекулярные наноструктуры, созданные природой за сотни миллионов лет эволюции, наиболее эффективны для решения ее задач: преобразования энергии из одной формы в другую, ускорения химических реакций, молекулярного транспорта и др.

В первую очередь, сказанное выше относится к фотосинтезу. Для преобразования световой энергии в электрическую и далее в энергию химических связей природой создано большое число супрамолекулярных наносистем, эффективно выполняющих эту задачу в конкретных биологических условиях. Физические механизмы, обеспечивающие эффективность природных систем, разнообразны и до конца не выяснены. Об одном из них — квантовой когерентности в явлениях переноса энергии и электрона — и пойдет речь в данной статье.

Когерентность — это явление согласованности между состояниями или процессами, в основе которого лежит интерференция. Например, если квантовое состояние представляет собой когерентную суперпозицию двух состояний с энергиями E_1 и E_2 :

$$\Psi(x) = c_1\Psi_1(x) + c_2\Psi_2(x),$$

где c_1 и c_2 — весовые коэффициенты, то зависимость от времени плотности вероятности этого состояния $\rho(x, t)$ определяется интерференционным слагаемым:

$$\Psi(x, t) = c_1 \Psi_1(x) e^{-\frac{i}{\hbar} E_1 t} + c_2 \Psi_2(x) e^{-\frac{i}{\hbar} E_2 t},$$

$$\rho(x, t) = |\Psi(x, t)|^2 = p_1 |\Psi_1(x)|^2 + p_2 |\Psi_2(x)|^2 + 2 \operatorname{Re} (c_1 c_2^* \Psi_1(x) \Psi_2^*(x)) \cos \left(\frac{i}{\hbar} (E_2 - E_1) t \right),$$

где $p_1 = |c_1|^2$, $p_2 = |c_2|^2$. Для сравнения, при отсутствии когерентности между состояниями 1 и 2 интерференционного вклада не будет и квантовая система останется в стационарном (смешанном) состоянии, в котором плотность вероятности не зависит от времени:

$$\rho(x, t) = p_1 \rho_1(x) + p_2 \rho_2(x),$$

где $\rho_i(x) = |\Psi_i(x)|^2$, $i = 1, 2$.

Когерентные явления играют важную роль в первичных процессах переноса энергии на световых стадиях фотосинтеза. Фотосинтетические устройства растений и бактерий содержат большое число сложных органических молекул — хлорофиллов и бактериохлорофиллов (общее название — пигменты, или хромофоры), организованных в супрамолекулярные наноструктуры — светопоглощающие фотоантенны [2]. Хромофоры в фотоантенне находятся в белковой среде, которая выполняет не только структурную, но и диссипативную роль, частично рассеивая энергию хромофоров.

Хромофоры фотоантенны поглощают свет и переходят в возбужденное электронное состояние. Избыточная электронная энергия передается по цепи хромофоров в антенне к другой наноструктуре — реакционному центру (далее — РЦ), где расходуется на разделение зарядов путем переноса электрона от одной части РЦ (донора) к другой (акцептору). Тем самым, световая энергия способствует созданию электрического потенциала, который затем используется для осуществления химических превращений.

В зависимости от пространственного расположения хромофоров и энергии взаимодействия между ними перенос энергии может быть как некогерентным, так и когерентным. В первом случае взаимодействие между молекулами мало и в каждый момент времени в возбужденном состоянии находится только один хромофор. Передавая энергию соседней молекуле, он возвращается в основное электронное состояние. Такой механизм называют некогерентным переносом энергии по Ферстеру. При сильном взаимодействии хромофоров электронное возбуждение может охватывать сразу несколько молекул — в этом случае говорят об экситонном механизме переноса, который имеет когерентный характер.

Дискуссия о роли когерентности в первичных стадиях фотосинтеза разгорелась 5 лет назад, когда с помощью новой экспериментальной методики — двумерной импульсной электронной спектроскопии с преобразованием Фурье (спектроскопии фотонного эха) было обнаружено, что квантовая когерентность при переносе энергии в фотоантенне зеленых серобактерий — в так называемом комплексе ФМО, содержащем 7 бактериохлорофиллов — сохраняется неожиданно долго — в течение 660 фс при температуре жидкого азота 77 К [3]. Аналогичные измерения с бактериохлорофиллом в растворе (CH_2Cl_2 или CHCl_3), то есть вне антенны и в отсутствие белкового окружения, показали отсутствие характерных для комплекса биений в зависимости сигнала от времени [4]. Тем самым, было доказано, что наблюдаемая в комплексе ФМО когерентность имеет не чисто колебательный внутримолекулярный характер, а вызвана взаимодействием хромофоров и связана с электронными или межмолекулярными колебательными степенями свободы.

Последующие исследования привели к обнаружению долгоживущей когерентности и в других фотосинтетических устройствах — реакционном центре пурпурных бактерий [5], одноклеточных морских водорослях [6], фотоантеннах LH2 пурпурных бактерий [7] и зеленых растений [8]. Более того, оказалось, что эта когерентность сохраняется и при комнатной температуре, правда в течение более короткого времени [5–7, 9], например 300 фс [9] против 660 фс при 77 К в комплексе ФМО. Последний факт и заставил исследователей предположить, что когерентность оказывается существенной для переноса энергии в фотосинтетических устройствах и поэтому является одним из факторов эволюционного развития этих организмов. Последняя часть этого утверждения сразу встретила естественное возражение [10]: все эксперименты, в которых был обнаружен когерентный перенос энергии, использовали возбуждение фотосинтетического устройства когерентным источником света — лазерным импульсом, тогда как в естественных условиях солнечное излучение когерентным не является, поэтому когерентность переноса не может быть фактором эволюции.

Хотя факт положительного влияния когерентной динамики на эффективность переноса энергии можно считать установленным, вопрос о механизмах этого влияния остается открытым. Первоначально появилась идея о том, что квантовая когерентность помогает фотоантеннам ускорить поиск конечного состояния с наименьшей энергией в процессе, аналогичном алгоритму квантового поиска Гровера [3, 11, 12]. Эта идея привела к ряду необоснованных громких утверждений, например о том, что «бактерия выполняет роль квантового компьютера». Однако затем было показано, что структура комплекса ФМО не удовлетворяет условиям, необходимым в алгоритме Гровера [13].

Вместо квантового поиска был предложен ряд других квантовых механизмов, которые учитывают роль белкового окружения [1, 13–15], в частности ENAQT (Environmentally-Assisted Quantum Transport) — квантовый транспорт при поддержке окружающей среды. В рамках моделей, основанных на ENAQT, для комплекса ФМО был получен интересный результат — эффективность переноса энергии в этом комплексе имеет необычную зависимость от температуры [1, 13, 16]. При низких температурах деструктивная интерференция квантовых путей переноса приводит к локализации возбуждения и уменьшению эффективности, при высоких температурах аналогичный эффект достигается путем уничтожения когерентности за счет взаимодействия хромофоров с белковым окружением. Оптимальной является промежуточная температура 290 К, близкая к физиологической для зеленых серобактерий: при этой температуре деструктивная когерентность уничтожается белком, а конструктивная сохраняется. Поэтому частично когерентный перенос оказывается более эффективным, чем полностью когерентный или полностью некогерентный.

Этот результат показывает, что белковое окружение в природных фотосинтетических устройствах может играть не только структурную и диссипативную роль, но и конструктивную, увеличивая эффективность переноса энергии путем тонкого влияния на интерференцию квантовых путей процесса.

Обсуждая влияние когерентности на биохимические процессы, необходимо учитывать, что это широкое понятие объединяет разные типы [10]: а) оптическую когерентность, которая связана с временными корреляциями в возбуждающем лазерном импульсе; б) когерентность электронных или колебательных состояний системы; в) когерентность процессов, связанную с интерференцией различных путей перехода от исходного состояния к конечному.

В данной работе мы рассмотрим влияние первых двух типов когерентности на хорошо известный элементарный биохимический процесс — первичный перенос электрона в РЦ пурпурных бактерий.

2. Влияние когерентности на перенос электрона в реакционных центрах пурпурных бактерий

Перенос электрона в РЦ пурпурных бактерий — один из наиболее широко изученных биохимических процессов. Цепь переноса состоит из специальной пары Р (димера бактериохлорофилла), двух бактериохлорофиллов B_a и B_b , бактериофеофитинов H_a и H_b , хинонов Q_a и Q_b и иона железа (рис. 1). Кофакторы в РЦ образуют симметричную структуру с осью симметрии C_2 , проходящей через центр специальной пары и негемовое железо. Донором электрона служит специальная пара, находящаяся в электронно-возбужденном состоянии (P^*), направления переноса электрона показаны стрелками на рис. 1. Существуют две ветви переноса — их называют А и В. Несмотря на симметрию самого РЦ, структура окружающего белка оказывается различной для ветвей А и В, результатом чего является селективный перенос только по ветви А — ее называют активной. Цепь В, очевидно, играет роль запасной.

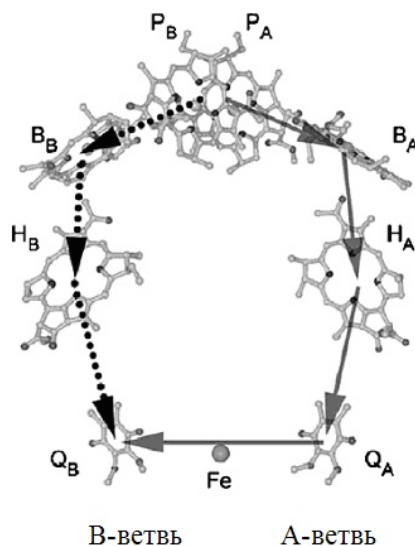


РИС. 1. Структура РЦ пурпурных бактерий и схема переноса электрона в РЦ. Сплошной линией показан перенос по А-ветви, пунктирной — по неактивной В-ветви [17]

Элементарный акт переноса электрона в реакционных центрах пурпурных бактерий сопряжен с эффектами тонкой перестройки геометрии взаимодействующих хромофоров. Так, например, внутримолекулярные движения амплитудой не более одного ангстрема могут приводить к значительной перестройке электронной структуры в ароматической системе порфириновых молекул. Такой эффект вызван тем, что низшая вакантная орбиталь молекулы донора электрона находится близко по энергии с вакантной орбиталью акцептора электрона, и небольшие изменения энергии взаимодействия с атомами могут менять порядок их расположения по энергии, делая термодинамически выгодным перенос электрона между ними. Существуют разные гипотезы относительно того, движение каких именно групп может быть сопряжено с переносом электрона; наиболее вероятными кандидатами являются внеплоскостные колебания магния, движения ацетильной группы и деформация ароматических колец [18]. Именно поэтому, говоря о когерентности элементарных стадий переноса электрона, мы будем иметь в виду не когерентность коллективного возбуждения электронных состояний (как в случае переноса энергии в фотоантеннах), а когерентность колебательного движения, сопряженного с переносом электрона.

Когерентность такого движения была доказана с помощью фемтосекундной спектроскопии феофитинмодифицированных мутантов бактерий *Rh. Sphaeroides* [19]. В них цепочка переноса электрона от первичного донора P^* через порфирин В и феофитин Н к координированному с атомом железа хинонам Q обрывается после первой же стадии ($P^*V \rightarrow P^+V^-$) из-за замены Н на его аналог с меньшим сродством к электрону. Это позволяет экспериментально наблюдать первичный элементарный акт переноса электрона без последующих за ним процессов. Данные работы показывают наличие когерентных колебаний заселенности состояний, которые затухают за времена порядка 600 фс. Фурье преобразование этих спектров дает частоты этих колебаний 130 и 32 см^{-1} , которые относятся к внутреннему движению порфириновых молекул (см. выше) и вращению молекулы воды.

Потеря колебательной когерентности связана с колебательной релаксацией, которая вызвана взаимодействием атомов, принимающих участие в движении по координате реакции, с белковым окружением хромофоров, играющим роль термостата. Благодаря сложной структуре белок может избирательно влиять на различные части цепи переноса электрона. Ранее мы показали, что интенсивность колебательной релаксации может быть разной для различных типов колебаний в РЦ [20]. Так, для одного и того же типа движения в разных мономерных фрагментах димера Р, скорость релаксации может различаться на несколько порядков, также она оказывается различной в состояниях до и после переноса электрона.

Степень когерентности колебательного движения при переносе электрона также зависит от способа создания возбужденного состояния. Если специальная пара в РЦ возбуждается посредством лазерного импульса (оптическая когерентность), образуется когерентное исходное состояние — волновой пакет (рис. 2), который локализован в узкой области межъядерных расстояний. В случае, если электронное возбуждение передается от фотоантенны или происходит с помощью некогерентных источников света, полученное состояние может быть частично когерентным или полностью некогерентным, то есть представлять собой статистическую смесь электронно-колебательных состояний. В таком состоянии колебательная плотность вероятности делокализована по всей допустимой по энергии области межъядерных расстояний.

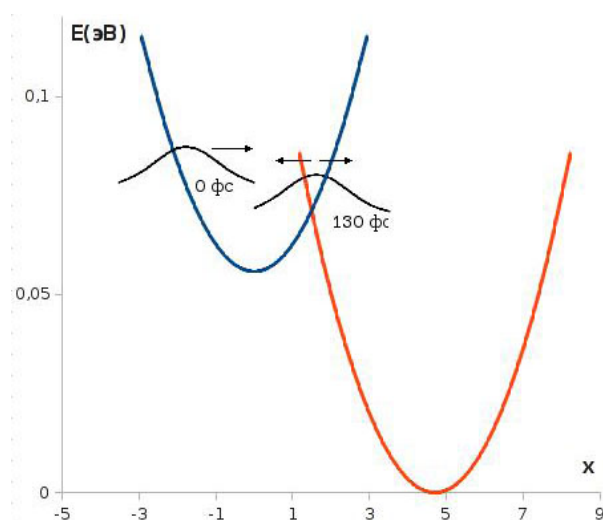


РИС. 2. Расположение сечений поверхности потенциальной энергии состояний P^*V (слева), P^+V^- (справа) по координате реакции переноса электрона (x). Также показано расположение волнового пакета в начальный момент времени и в момент первого достижения точки пересечения

В данной работе мы исследуем влияние на скорость и эффективность первичного переноса электрона двух важных факторов: 1) степени когерентности исходного состояния донора электрона; 2) интенсивности взаимодействия хромофоров с белковым окружением, приводящего к колебательной релаксации. Для расчетов мы использовали одномерную модель диссипативной колебательной динамики [21] на основе теории Редфилда [22]. Динамика переноса описывается зависимостью от времени редуцированной матрицы плотности системы хромофоров, а белковое окружение считается находящимся в термодинамическом равновесии.

В рамках предложенной модели электронные состояния системы до и после разделения заряда (P^*V и P^+V^-) представляются двумя пересекающимися термами — гармоническими осцилляторами [21]. Параметры модели подобраны таким образом, чтобы воспроизводить экспериментальные фемтосекундные спектры поглощения продукта разделения заряда [19].

В когерентном случае временную эволюцию системы можно представить движением волнового пакета (аналога классической частицы) по электронным термам (рис. 2). При достижении им точки пересечения становится возможным перенос электрона, который в данной модели представляется переходом на другую поверхность потенциальной энергии (другой терм).

Это явление наглядно продемонстрировано на рис. 3: увеличение заселенности второго состояния происходит скачками в моменты времени, соответствующие проходу волновым пакетом точки пересечения термов. В случае же, когда исходное состояние является полностью некогерентным, благодаря пространственной делокализации часть колебательной плотности вероятности окажется в области пересечения термов и перенос электрона станет возможным сразу после возбуждения.

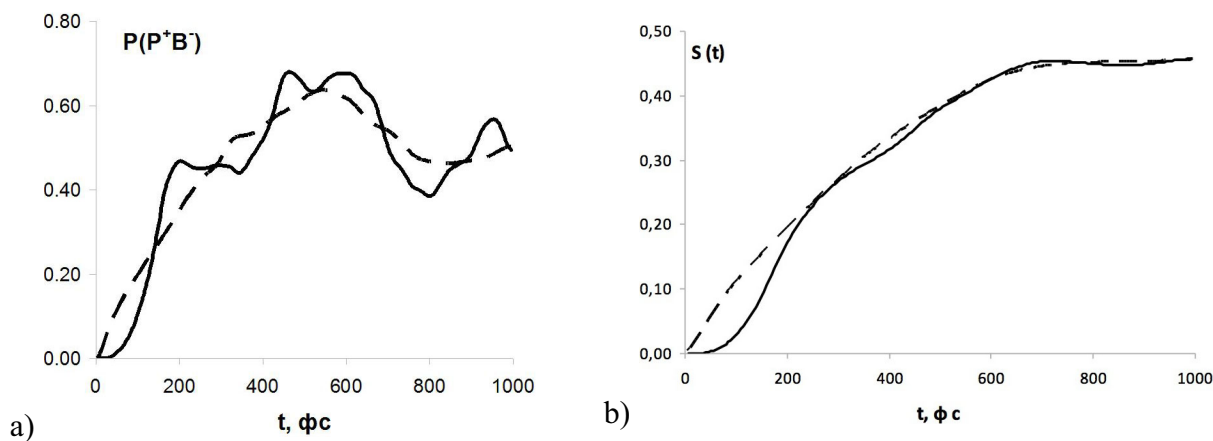


РИС. 3. Зависимость от времени заселенности состояния с разделенными зарядами P^+V^- для когерентного (сплошная линия) и некогерентного (пунктирная линия) исходного состояния: а) локальная заселенность $P(t)$; б) средняя заселенность $S(t) = \frac{1}{t} \int_0^t P(\tau) d\tau$

На рис. 3а показана динамика заселенности состояния с разделенными зарядами P^+V^- (продукта первой стадии переноса электрона) для когерентного и некогерентного случаев. В случае когерентного движения видна явно выраженная ступенчатая зависимость, которая объясняется периодическим прохождением локализованного волнового пакета через область пересечения термов. При каждом таком прохождении часть волнового пакета переходит в состояние, соответствующее P^+V^- , и заселенность этого состояния

увеличивается. На графике видно, что процесс переноса имеет обратимый характер. Это связано с тем, что волновой пакет совершает периодическое движение и в состоянии с разделенными зарядами, поэтому проходя через точку пересечения термов он с некоторой вероятностью может вернуться в исходное состояние P^*V , что приводит к уменьшению заселенности.

В случае же некогерентного колебательного распределения ступенчатая структура зависимости заселенности от времени отсутствует — это связано с пространственной делокализацией исходного состояния. Однако, из рис. 3а видно, что несмотря на различный ход двух кривых, при больших временах (>1000 фс) они стремятся к близким значениям. Более наглядно это можно увидеть на кривых средней интегральной заселенности $S(t) = \frac{1}{t} \int_0^t P(\tau) d\tau$ (рис. 3б). Это свидетельствует о том, что когерентность исходного состояния влияет на эффективность переноса электрона лишь при малых временах (до 300–400 фс), порядка одного периода колебаний по координате реакции. После этого времени средняя эффективность переноса электрона практически не зависит от степени когерентности исходного состояния. Одно из возможных объяснений этого факта состоит в том, что когерентность увеличивает вероятность как прямого, так и обратного процесса. Если это так, то теоретически возможно увеличить эффективность переноса путем «селективной» потери когерентности в состоянии P^+V^- за счет взаимодействия с белковым окружением и диссипации колебательной энергии.

Возможность такого явления мы продемонстрировали, варьируя в рамках нашей модели интенсивность взаимодействия продукта реакции P^+V^- с белковым окружением, при этом в исходном состоянии P^*V динамика считалась чисто когерентной. Тем самым мы применили модель «селективного термостата» [21]. Физически это оправдано, так как в состоянии с разделенными зарядами можно ожидать более сильного взаимодействия хромофоров с белком, чем в исходном состоянии.

На рис. 4 представлены зависимости заселенности продукта от времени при различных значениях интенсивности взаимодействия. Изображены кривые для сильного, слабого и нулевого взаимодействия; последняя соответствует отсутствию диссипации и чисто когерентному движению. На этом рисунке отчетливо видно, что при увеличении интенсивности взаимодействия уменьшается высота всех «ступенек» на кривых заселенности, то есть вероятность перехода из одного состояния в другое падает. При этом, несмотря на то, что локальные максимумы заселенности выше для когерентного движения, чем в случае диссипации, при больших временах выход реакции, то есть эффективность переноса электрона тем больше, чем сильнее взаимодействие конечного состояния с белком. Это можно объяснить тем, что снижение вероятности прямого перехода не так заметно, как обратного, т.е. в исследованной области параметров «полезная» когерентность (прямая реакция) затухает чуть медленнее, чем «деструктивная» (обратная реакция). Этот факт дает основание полагать, что в биологических системах за счет диссипации возможен механизм селективного затухания именно деструктивной когерентности, то есть белковое окружение, благодаря своему сложному строению и разнообразию функциональных групп может распознавать различные типы когерентности, оставляя только полезные.

В дальнейшем мы планируем подтвердить этот вывод и распространить его на другие процессы в супрамолекулярных биохимических наносистемах.

3. Заключение

На примере конкретной биохимической системы — реакционного центра пурпурных бактерий — мы рассмотрели влияние различных типов когерентности на элементарный

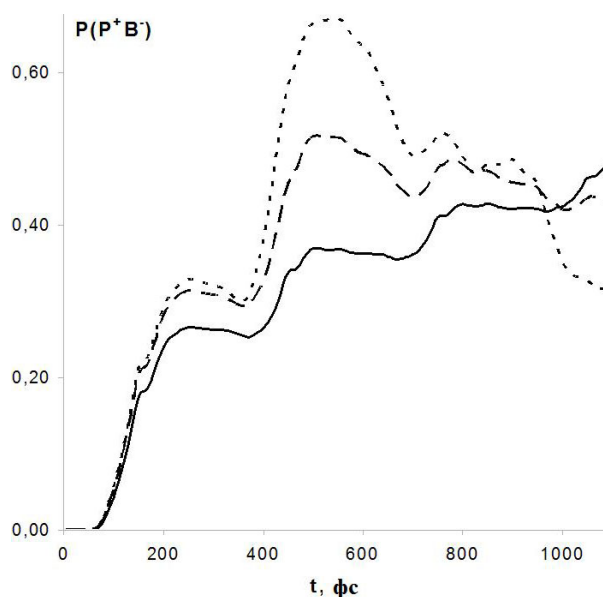


РИС. 4. Зависимость от времени заселенности состояния с разделенными зарядами при различной интенсивности взаимодействия с белком. Сильное взаимодействие — сплошная линия, слабое — пунктирная, отсутствие взаимодействия (когерентное движение) — точечная

процесс первичного переноса электрона от специальной пары к мономерному бактериохлорофиллу. Используя модель одномерных гармонических осцилляторов для электронных состояний донора и акцептора и применяя теорию Редфилда для описания диссипативной динамики в белковой среде, мы показали, что когерентность исходного состояния оказывает влияние на скорость и эффективность переноса электрона лишь при малых временах, до 300 фс. Усредненная по большому промежутку времени эффективность переноса практически не зависит от степени когерентности исходного состояния.

Значительно большее влияние на эффективность процесса оказывает взаимодействие продукта реакции с белком, которое приводит к локализации волнового пакета в соответствующем электронном состоянии посредством диссипации колебательной энергии и связанного с этим уменьшения вероятности обратного процесса рекомбинации зарядов. Наши результаты подтверждают популярную в последние годы идею о том, что путем тонко настроенной диссипации белковое окружение увеличивает эффективность квантового транспорта (переноса) в биохимических системах [1].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 12-03-31084 и ФЦП Министерства образования РФ №86-35.

Литература

- [1] Lloyd S. Quantum coherence in biological systems // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2011. — V. 302. — P. 012037.
- [2] Blankenship R.E. *Molecular mechanisms of photosynthesis*. Blackwell Science, London, 2009. — 321 p.
- [3] Engel G.S., Calhoun T.R., et al. Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems // *Nature*. — 2007. — V. 446. — P. 782–786.
- [4] Fransted K.A., Caram J.R., Hayes D., Engel G.S. Two-dimensional electronic spectroscopy of bacteriochlorophyll a in solution: Elucidating the coherence dynamics of the Fenna-Matthews-Olson complex using its chromophore as a control // *J. Chem. Phys.* — 2012. — V. 137. — P. 125101.
- [5] Lee H., Cheng Y.-C., Fleming G.R. Coherence dynamics in photosynthesis: protein protection of excitonic coherence // *Science*. — 2007. — V. — 316. — P. 1462–1465.

- [6] Collini E., Wong C. Y., et al. Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature // *Nature*. — 2010. — V. 463. — P. 644–647.
- [7] Harel E., Engel G.S. Quantum coherence spectroscopy reveals complex dynamics in bacterial light-harvesting complex 2 (LH2) // *Proc. Natl. Acad. Sci.* — 2012. — V. 109, No. 3. — P. 706–711.
- [8] Calhoun T.R., Ginsberg N.S., et al. Quantum coherence enabled determination of the energy landscape in light-harvesting complex II // *J. Phys. Chem. B*. — 2009. — V. 113, No. 51. — P. 16291–16295.
- [9] Panitchayangkoon G., Hayes D., et al. Long-lived quantum coherence in photosynthetic complexes at physiological temperature // *Proc. Natl. Acad. Sci.* — 2010. — V. 107, No. 29. — P. 12766–12770.
- [10] Kassal I., Yuen-Zhou J., Rahimi-Keshari S. Does coherence enhance transport in photosynthesis? // 2012. — arXiv:1210.5022.
- [11] Ishizaki A., Fleming G.R. Quantum coherence in photosynthetic light harvesting // *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* — 2012. — V. 3. — P. 333–361.
- [12] Grover L.K. Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack // *Phys. Rev. Lett.* — 1997. — V. 79, No. 2. — P. 325–328.
- [13] Mohseni M., Rebentrost P., Lloyd S., Aspuru-Guzik A. Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer // *J. Chem. Phys.* — 2008. — V. 129. — P. 174106.
- [14] Panitchayangkoon G., Voronine D.V., et al. Direct evidence of quantum transport in photosynthetic light-harvesting complexes // *Proc. Natl. Acad. Sci.* — 2011. — V. 108, No. 52. — P. 20908–20912.
- [15] Kassal I., Aspuru-Guzik A. Environment-assisted quantum transport in ordered systems // *New J. Phys.* — 2012. — V. 14. — P. 053041.
- [16] Rebentrost P., Mohseni M., et al. Environment-assisted quantum transport // *New J. Phys.* — 2009. — V. 11, No. 3. — P. 033003.
- [17] Frolov D., Wakeham M.C., et al. Investigation of B-branch electron transfer by femtosecond time resolved spectroscopy in a *Rhodobacter sphaeroides* reaction centre that lacks the QA ubiquinone // *Biochimica et Biophysica Acta*. — 2005. — V. 1707. — P. 189–198a.
- [18] Yakovlev A.G., Shkuropatov A.Y., Shuvalov V.A. Nuclear wavepacket motion producing a reversible charge separation in bacterial reaction centers // *FEBS Letters*. — 2000. — V. 466. — P. 209–212.
- [19] Yakovlev A.G., Shkuropatov A.Y., Shuvalov V.A. Nuclear Wave Packet Motion between P* and P⁺B_A-Potential Surfaces with a Subsequent Electron Transfer to H_A in Bacterial Reaction Centers at 90 K. Electron Transfer Pathway // *Biochemistry*. — 2002. — V. 41. — P. 14019–14027.
- [20] Глебов И.О., Еремин В.В. Новый способ расчета параметров диссипации в сверхбыстрых биохимических реакциях по данным о структуре белкового окружения // *Биофизика*. — 2012. — Т. 57, № 4. — С. 589–597.
- [21] Глебов И.О., Еремин В.В. Влияние диссипации на колебательную динамику в системе двух взаимодействующих электронных состояний // *Ж. физ. химии*. — 2008. — Т. 82, № 4. — С. 684–689.
- [22] Redfield A.G. The Theory of Relaxation Processes // *Adv. Magn. Res.* — 1965. — V. 1. — P. 1–8.

THE ROLE OF COHERENCE IN ELECTRON TRANSFER PROCESSES OCCURRING IN NATURAL BIOCHEMICAL NANOSYSTEMS

V. V. Eremin, I. O. Glebov, V. V. Poddubnyi

Chemistry Department, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The paper describes the influence of optical coherency and vibration dissipation into protein environment on the effectiveness of electron transfer in reaction centers of purple bacteria.

Keywords: coherence, photosynthesis, reaction center, dissipation, relaxation, electron transfer, Redfield theory, purple bacteria.