

XII Международная конференция
"Суперкомпьютерные дни в России"

Семинар Квантовые вычисления

Москва, 29 сентября 2026 г.

Когерентные квантовые эффекты в
фотосинтезирующей системе
живых организмов

Г.Э. Норман, А.В. Ланкин



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИИТ



План

1. Проблемы, возникшие в последние 20 лет

2. Фрагментарные продвижения
в направлении решения

частных составляющих этих проблем.

3. Гипотеза механизма

сохранения когерентности, основанная
на квантовом эффекте Зенона-Халфина

1. Проблемы, возникшие в последние 20 лет.

(а) Возможность переноса экситона
в антенных комплексах,
отличного от классической диффузии.

Brixner T., Stenger J., Vaswani H. M., Cho M., Blankenship R. E., Fleming G. R.

Two-dimensional spectroscopy
of electronic couplings in photosynthesis.
Nature. — 2005. — Vol. 434, No. 7033. — P. 625–628.

Miraglia F. E.

Quantum Biology and Medicine:
Discovering the Secrets of Life and Healing,
International Journal of Informational Integrative Medicine. 2026; 2(2) : 1-9.

(б) Высокое значение времени сохранения когерентности
даже в условиях физиологических температур.

Engel G. S., Calhoun T. R., Read E. L., Ahn T.-K., Mančal T.,
Cheng Y.-C., Blankenship R. E., Fleming G. R.

Evidence for wavelike energy transfer
through quantum coherence in photosynthetic systems.

Nature. — 2007. — Vol. 446, No. 7137. — P. 782–786.

Panitchayangkoon G., Hayes D., Fransted K. A.,
Caram J. R., Harel E., Wen J., Blankenship R. E., Engel G. S.

Long-lived quantum coherence in photosynthetic complexes
at physiological temperature.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.
— 2010. — Vol. 107, No. 29. — P. 12766–12770.

Collini E., Wong C. Y., Wilk K. E., Curmi P. M. G., Brumer P., Scholes G. D.

Coherently wired light-harvesting
in photosynthetic marine algae
at ambient temperature.

Nature. — 2010. — Vol. 463, No. 7281. — P. 644–647.

(в) Связь колебательных мод белковой матрицы и электронного возбуждения молекул хлорофилла.

Ma F., Romero E., Jones M. R., Novoderezhkin V. I., van Grondelle R.

Both electronic and vibrational coherences are involved in primary electron transfer in bacterial reaction center.

Nature Communications. — 2019. — Vol. 10. — Art. 933.

2. Фрагментарные продвижения в направлении решения частных составляющих этих проблем.

(a) Рассмотрена одномерная цепочка связанных осцилляторов при различных значениях параметра связи со средой (декогеренции).

Mohseni M., Rebentrost P., Lloyd S., Aspuru-Guzik A.

Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer

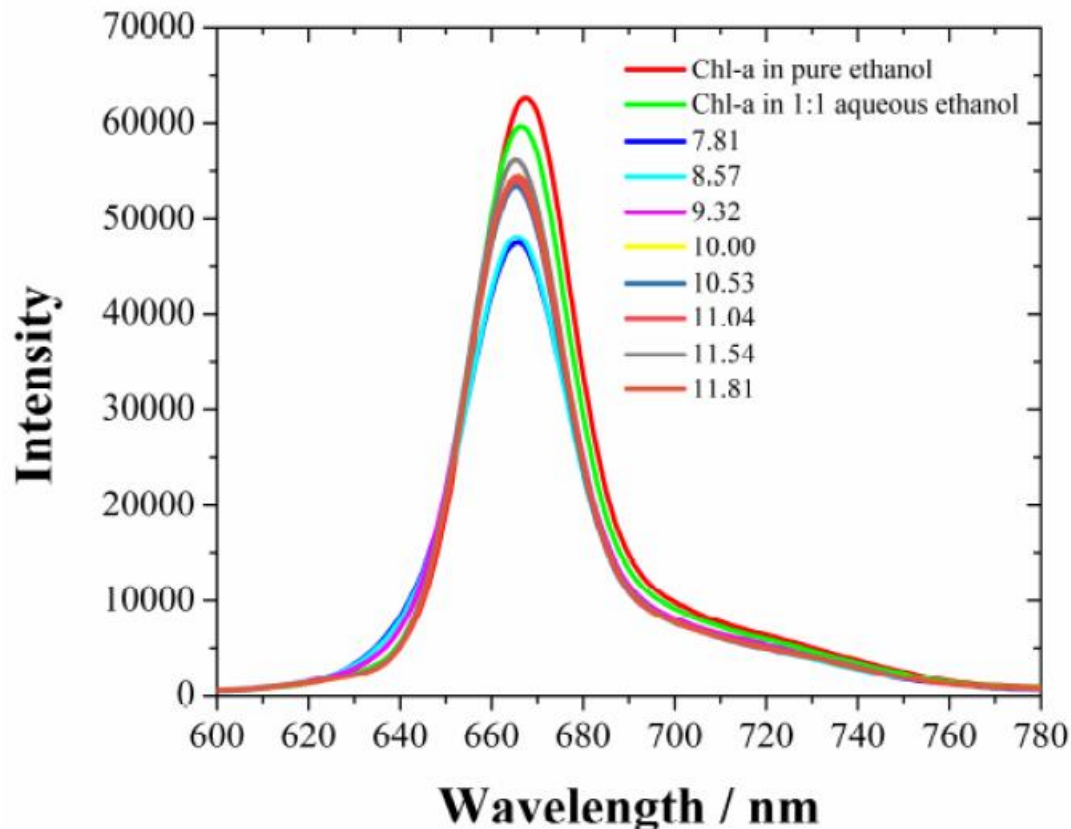
The Journal of Chemical Physics. — 2008. — Vol. 129, No. 17. — 174106.

Показано:

- в условиях стохастического разброса уровней цепочки наличие умеренной связи между цепочкой и средой обеспечивает скорость переноса, превышающую и классическую диффузию, и чистый случай когерентного волнового переноса;
- когерентный перенос при полном отсутствии декогеренции подавляется эффектом локализации Андерсона,
- однако наличие слабой декогеренции снимает этот эффект.

(б) Выявлены источники локализации Андерсона
в системе молекул хлорофилла:

- стохастический сдвиг уровней из-за тепловых флуктуаций
в гидратных оболочках молекул хлорофилла;
- протонирование молекул хлорофилла.



Qu F., Gong N., Wang S., Gao Y.,
Sun C., Fang W., Men Z.

Effect of pH
on fluorescence
and absorption
of aggregates
of chlorophyll a
and carotenoids.

Dyes and Pigments. — 2020. —
Vol. 173. — 107975.

(в) Димер галофлуоресцеина изучен
с помощью неадиабатической молекулярной динамики (НАМД)
с совместным применением метода прыжков (FSSH, Tully)
между поверхностями потенциальной энергии
и явного расчета амплитуд состояний,
соответствующих разным поверхностям потенциальной энергии.

Freixas V. M., Tretiak S., Makhov D. V., Shalashilin D. V., Fernandez-Alberti S.

Vibronic quantum beating

between electronic excited states in a heterodimer

The Journal of Physical Chemistry B. — 2020. — Vol. 124, No. 19. — P. 3992–4001.

Показано, что в системах органических красителей
возможно сильное фонон-экситонное взаимодействие
с формированием долгоживущих
коррелированных состояний экситонов и фононов,
которые могут сильно влиять на перенос экситона в среде.

(г) Аналогичный эффект ожидается
и для молекул хлорофилла в белковой матрице.

Ruan M., Weng Y.

Exploring biological quantum effects
in photosynthesis across varied spatial scales.

The Journal of Physical Chemistry B. — 2026. — Vol. 130, No. 15. — P. 4017–4040.

Из НАМД и эксперимента сделан осторожный вывод,
что связь между колебательными модами белковой матрицы
и электронным состоянием молекул хлорофилла
является основным механизмом, обеспечивающим
неклассический перенос экситона в фотосинтезирующей системе.

**Белковая матрица является не только
пассивной поверхностью для крепления молекул хлорофилла,
но и активной средой, обеспечивающей
сохранение когерентного состояния экситона.**

Механизм стабилизации когерентного состояния экситона
связан с диссипацией энергии
резонансных колебательных мод белковой матрицы.

Резюме 1

Несмотря эти успехи в анализе
процесса переноса экситона в теплой среде,
вопрос о механизме, обеспечивающем столь высокое время
когерентности экситона в фотосинтезирующей системе,
которое наблюдается в эксперименте и которое
позволяет проявляться эффектам неклассического переноса,
остаётся открытым.

Объяснений значительных времен когерентности,
наблюдаемых в эксперименте для экситонов
в антенном комплексе фотосинтезирующих организмов,
сейчас нет.

Dudhe N., Sahoo P. K., Benjamin C.

Testing quantum speedups in exciton transport
through a photosynthetic complex using quantum stochastic walks.
Physical Chemistry Chemical Physics. — 2022. — Vol. 24, No. 4. — P. 2601–2613.

Резюме 2

Однако получены указания,
что данный эффект связан
с активной ролью белковой матрицы,
а также с диссипативными процессами в ней
с участием резонансных колебательных мод.

Ruan M., Weng Y.

Exploring biological quantum effects
in photosynthesis across varied spatial scales.

The Journal of Physical Chemistry B. — 2026. — Vol. 130, No. 15. — P. 4017–4040.

3. Гипотеза
механизма сохранения когерентности,
основанная на
квантовом эффекте Зенона-Халфина

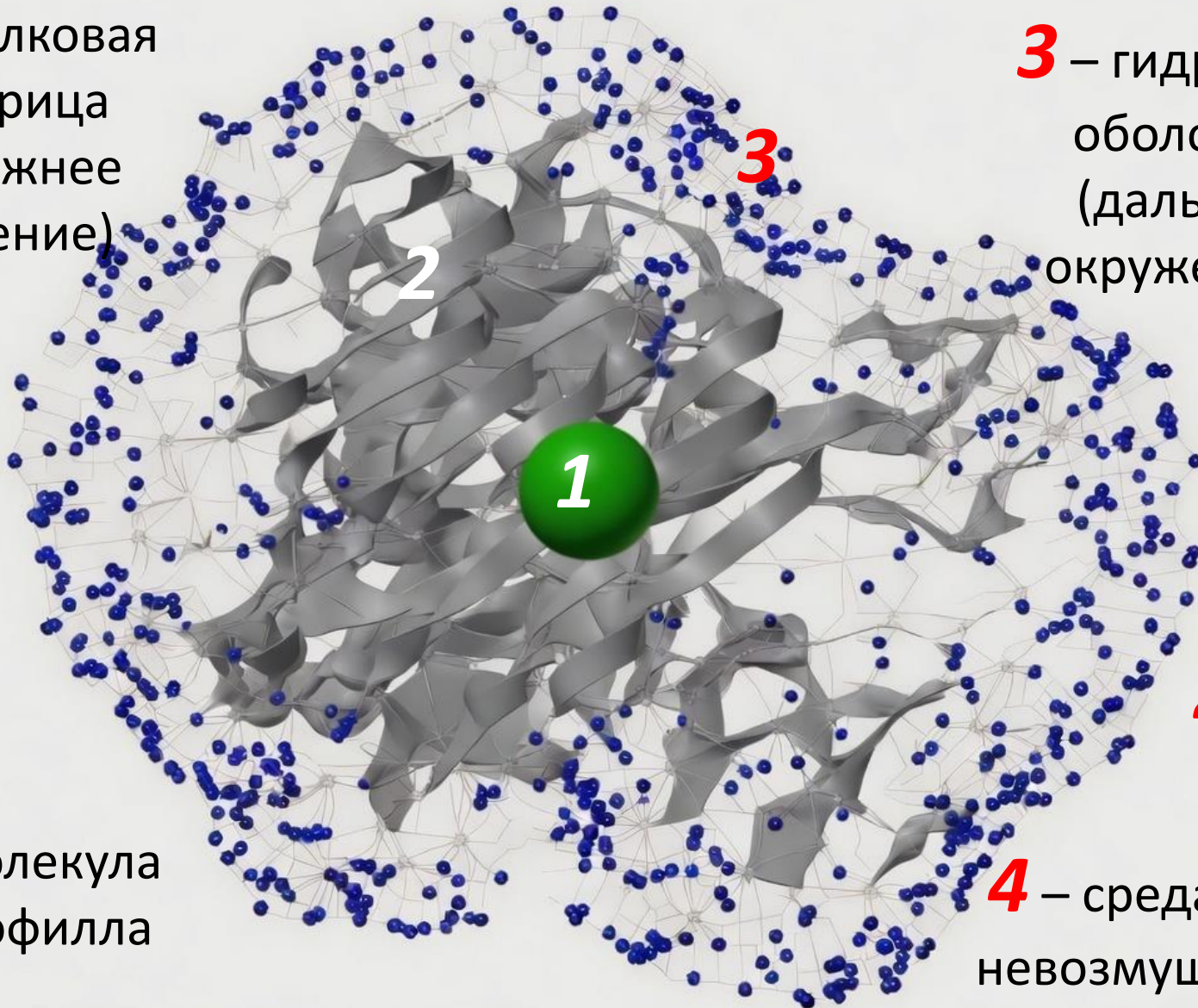
Очень схематично!

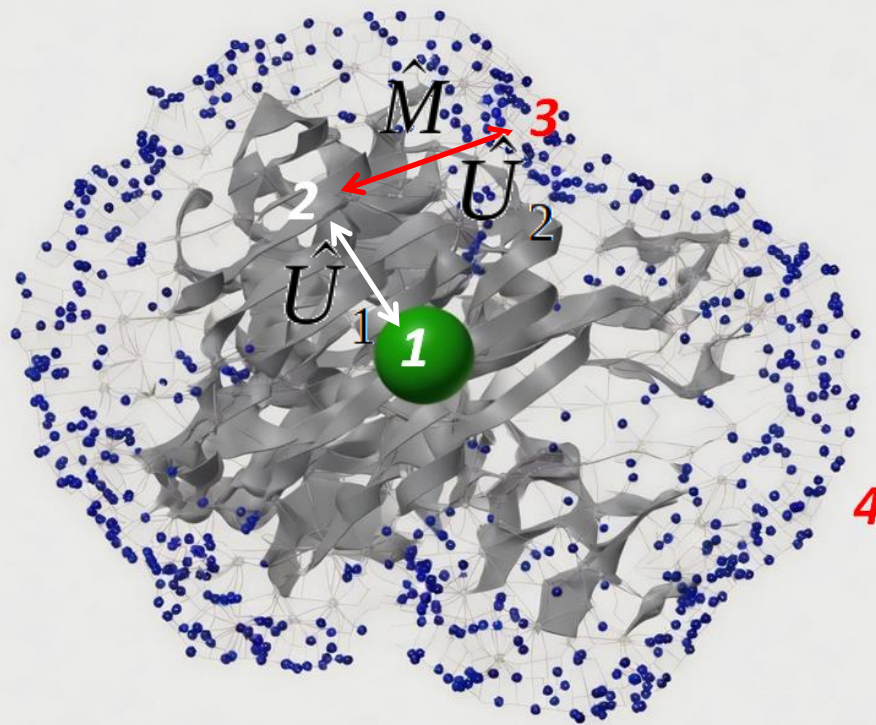
2 – белковая матрица
(ближнее окружение)

3 – гидратная оболочка
(дальнее окружение)

1 – молекула хлорофилла

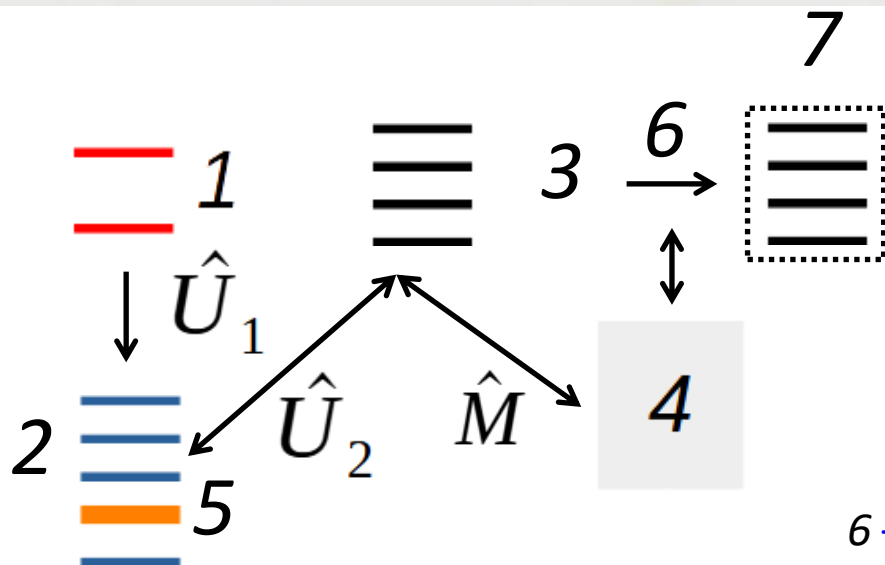
4 – среда (вода невозмущенная)





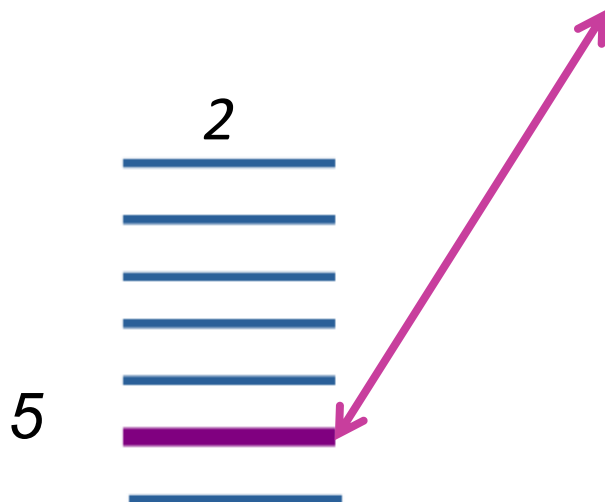
1 – молекула хлорофилла в
 белковой матрице, моделируемая
 двухуровневой системой,
 2 – белковая матрица,
 моделируемая многоуровневой
 системой, описывающей её
 колебательные состояния,
 3 – гидратная оболочка
 (дальнее окружение),
 4 – классическая среда
 (невозмущенная вода),
 $\hat{U}_1$ – унитарное взаимодействие
 хлорофилла с белковой матрицей,

$\hat{U}_2/\hat{M}$ – унитарное/неунитарное
 взаимодействие белковой матрицы
 с дальним окружением и средой,



5 – выделенное колебательное состояние, на
 котором белковая матрица будет
 удерживаться в результате эффекта Зенона-
 Халфина, вызванным непрерывным
 измерением $\hat{U}_1\hat{M}\hat{U}_1\hat{U}_2\hat{M}\hat{U}_1\hat{U}_2\hat{M}\hat{U}_1\hat{U}_2\hat{M} \dots$,
 6 – декогеренция состояний дальнего окружения,
 7 – некогерентная смесь состояний дальнего
 окружения.

Гипотеза о механизме
оператора неунитарного
взаимодействия $\hat{M}$



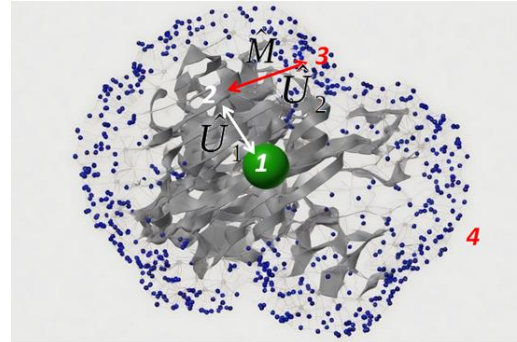
Система колебательных
уровней белковой матрицы 2
с выделенным уровнем 5.

Дополнительный уровень 12,
энергия перехода в который из уровня 5
совпадает с энергией фона нетепловых фононов.

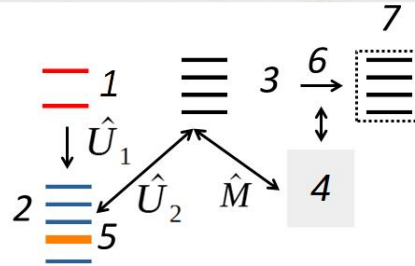
Выводы

1. Предложен механизм сохранения когерентности экситона в фотосинтезирующей системе живого организма, основанный на эффекте Зенона-Халфина.

2. Рассмотрен перенос информации в ближнем и дальнем окружении экситона и подавление декогеренции экситона в условиях возникновения эффекта Зенона-Халфина в ближнем окружении экситона.



$\hat{U}_1 \hat{M} \hat{U}_1 \hat{U}_2 \hat{M} \hat{U}_1 \hat{U}_2 \hat{M} \hat{U}_1 \hat{U}_2 \hat{M} \dots$
— механизм непрерывного измерения



3. Предложена гипотеза возникновения эффекта четких измерений $\hat{M}$ в активной белковой матрице, находящейся в нетепловом состоянии.

