

Предлагаемый алгоритм создания перепутанности на больших расстояниях основывается на нелокальном измерении четности, осуществляемом с помощью нелинейного взаимодействия вспомогательного поля с исходными модами и последующего измерения фазы вспомогательного поля. Вероятность получения неопределенного результата данного измерения достаточно велика при малой амплитуде вспомогательного поля, однако определенные локальные преобразования и дополнительное измерение четности позволяют получить перепутанные состояния даже в случае нескольких неудачных измерений. Путем уменьшения амплитуды вспомогательного поля и, следовательно, увеличения числа операций, необходимых для достижения результата, можно получить требуемое значение перепутанности. При использовании оптоволоконного канала для передачи поля между лабораториями создание перепутанности $E=0.8$ возможно на расстояниях до 65 км.

Предложенная схема может быть обобщена на случай использования промежуточных лабораторий и при этом позволяет создавать перепутанные состояния на расстояниях, превышающих 130 км. Предполагается, что описанный метод может также использоваться при малой нелинейности взаимодействия и в определенных случаях позволяет создавать состояния с перепутанностью, превышающей 1.

ТУШЕНИЕ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CDSE/ZNS В РАСТВОРЕ И В СОСТАВЕ ЛИПИДНЫХ ВЕЗИКУЛ

В. А. Решетов

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проявляется большой интерес к использованию квантовых точек (КТ) в различных медико-биологических приложениях. Малый размер КТ по сравнению с биологически функциональными молекулами, возможность изменять их биохимические свойства, а также уникальные фотофизические свойства делают эти материалы подходящими для биомедицинских целей [1]. На основе этих соединений возможно создание средств терапевтического вмешательства и обнаружения клинически значимых маркеров. Важной задачей на пути использования КТ в таких приложениях является создание вводимых в биосистемы КТ и исследование механизмов их взаимодействия с клеточными структурами.

Клеточные мембраны являются одними из основных структурами, в которых могут локализоваться КТ, поэтому представляет большой интерес процессы взаимодействия их с КТ. Включение КТ в состав биологи-

ческих мембран (липидных везикул) придает КТ свойство водорастворимости и может быть использовано для введения КТ в биосистемы.

В данной работе исследовалось спектрально-флуоресцентными методами взаимодействие КТ на основе CdSe/ZnS с модельными мембранами – униламеллярными липидными везикулами.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Квантовые точки

КТ CdSe/ZnS с диаметром ядра CdSe около 2.5 нм были синтезированы и любезно предоставлены М.В. Артемьевым (НИИ ПХП БГУ). Использовались немодифицированные КТ (КТН), находящиеся в тетрагидрофуране, и КТ, модифицированные для обеспечения водорастворимости одним из следующих веществ: меркаптоундекановой кислотой (КТМ), глутатионом (КТГ) либо полиэтиленгликолем (КТП), и находящиеся в водных растворах. Спектральные характеристики всех исследованных КТ близки.

Концентрации КТ в растворах определяли спектрометрически, используя известные значения коэффициентов молярной экстинкции: $C(\text{КТМ}) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ М}$, $C(\text{КТГ}) = 4.1 \cdot 10^{-5} \text{ М}$, $C(\text{КТП}) = 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ М}$, $C(\text{КТН}) = 3 \cdot 10^{-5} \text{ М}$.

2.2. Приготовление липосом

В проведенных исследованиях использовались липидные везикулы (ЛВ), приготовленные из димиристоилфосфатидилхолина и яичного лецитина инъекционным или ультразвуковым методом аналогично [2, 3]. КТ вводились в раствор липидной суспензии на стадии приготовления. Качество суспензии униламеллярных ЛВ контролировали на основании измерений их светорассеяния.

2.3. Спектрально-флуоресцентные измерения

Образец суспензии помещали в термостатируемую ячейку спектрофлуориметра Solar SFL-1211A и регистрировали интенсивность флуоресценции КТ при длине волны возбуждения $\lambda_{\text{ex}} = 425 \text{ нм}$, регистрации – $\lambda_{\text{em}} = 535 \text{ нм}$ при постоянном перемешивании образца.

2.4. Исследование тушения флуоресценции КТ

При исследовании тушения флуоресценции КТ использовался мембранонепроницающий тушитель йодид калия (KI) с концентрацией исходного раствора 6М. Для предотвращения восстановления йода использовался тиосульфат натрия. В отдельных экспериментах изменение ионной силы раствора при добавлении йодида калия компенсировали добав-

лением KCl [4]. Результаты измерения корректировались с учетом разбавления образцов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На *рис.1* представлены спектры поглощения и флуоресценции КТН в растворе тетрагидрофурана и КТМ в водном растворе. Все исследуемые КТ характеризуются широким спектром поглощения с характерными максимумами на длине волны 425 нм и 525 нм, а также интенсивной флуоресценцией с максимумом на длине волны 535 нм. Спектры поглощения и флуоресценции КТГ и КТП в водном растворе совпадают со спектрами для КТМ. Включение КТ в состав ЛВ не изменяет существенно их флуоресцентные свойства. Наблюдается смещение максимума спектра флуоресценции к 540 нм.

Для того, чтобы охарактеризовать механизм взаимодействия КТ с липидными мембранами, использовался метод мембранонепроницающих тушителей флуоресценции. Ионы йода не проникают через липидный бислой, поэтому эффективность тушения флуоресценции позволяет проанализировать характер включения КТ в ЛВ.

КИ эффективно тушит флуоресценцию водорастворимых КТ. Зависимость степени тушения от концентрации тушителя подчиняется простому уравнению Штерна-Фольмера (*рис.2*). Этот факт позволяет просто определить кажущиеся константы тушения флуоресценции (K_Q) для КТ. Полученные данные измерений K_Q для КТ приведены в *таблице*.

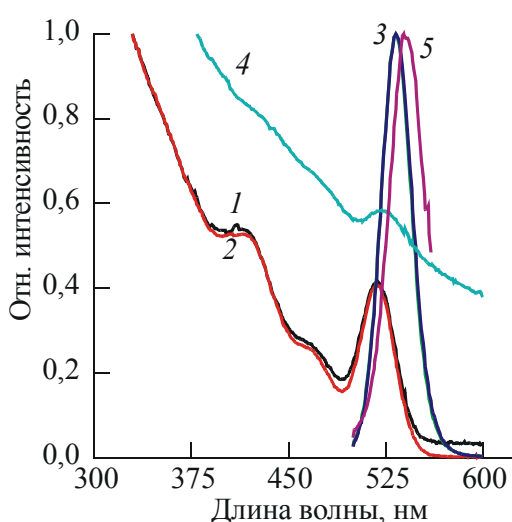


Рис.1. Спектры флуоресценции и поглощения КТ:

- 1 – поглощения КТМ, 2 – поглощения КТН,
- 3 – флуоресценции КТМ и КТН,
- 4 – поглощение КТН в составе ЛВ,
- 5 – флуоресценции КТН в составе ЛВ

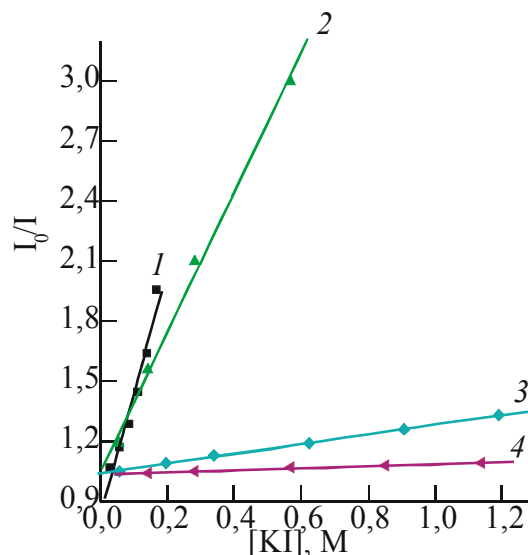


Рис.2. Зависимости Штерна-Фольмера:

- 1 – КТМ в водном растворе,
- 2 – КТМ в составе суспензии ЛВ,
- 3 – КТН в составе инъекционных ЛВ,
- 4 – КТН в составе ультразвуковых ЛВ

Таблица

Описание	K_Q (КТМ), M^{-1}	K_Q (КТГ), M^{-1}	K_Q (КТП), M^{-1}	K_Q (КТН), M^{-1}
КТ в водном растворе	6.4 ± 1.3	2.3 ± 0.4	3.1 ± 0.6	не изуч.
КТ в составе суспензии ЛВ	3.5 ± 0.9	не изуч.	6.2 ± 1.3	не изуч.
КТ в водном растворе с предварительной обработкой спиртом	6.0 ± 1.2	2.3 ± 0.5	2.9 ± 0.5	не изуч.
КТН в составе ультразвуковых ЛВ	не изуч.	не изуч.	не изуч.	0.06 ± 0.02
КТН в составе инъекционных ЛВ	не изуч.	не изуч.	не изуч.	0.31 ± 0.08

Введение КТМ, КТГ и КТП в состав суспензии ЛВ на стадии приготовления несколько изменяет характеристики тушения в сравнении с водным раствором КТ. Для КТМ K_Q уменьшается на 40 %, для КТП – увеличивается в 2 раза.

Поскольку встраивание КТ в липосомы сопряжено с воздействием этанола на КТ, мы исследовали характеристики тушения флуоресценции водорастворимых КТ, предварительно обработанных этанолом. Как следует из данных, приведенных в таблице, этанол не оказывает существенного влияния на величину K_Q . На основании этого можно предположить, что различный характер изменений K_Q связан с особенностями взаимодействия отдельных типов КТ с ЛВ.

В сравнении с водорастворимыми КТ, эффективность тушения флуоресценции КТН в суспензиях ЛВ крайне низка (рис.2). Рассчитанные значения K_Q для КТН в десятки раз ниже, чем для водорастворимых КТ (см. таблицу). Отличия величины K_Q для КТН в инъекционных и ультразвуковых ЛВ может быть связано с особенностями структуры различных ЛВ.

Исходя из полученных результатов, можно сделать ряд заключений о локализации КТ в составе липидного бислоя. Крайне низкая степень тушения КТН свидетельствует о том, что эти КТ располагаются в глубине липидной фазы, что исключает их контакт с водной средой. Модифицированные КТ, очевидно, локализуются на границе раздела бислой–среда. Подобное расположение оставляет их доступными для взаимодействия с ионами йода, что и обуславливает высокие значения констант тушения флуоресценции этих точек в суспензии липосом.

Таким образом, использование метода тушения флуоресценции позволяет охарактеризовать механизмы связывания КТ в составе мембран. Наши результаты показывают, что физико-химические свойства КТ непосредственно влияют на локализацию КТ в составе ЛВ.

Литература

1. *Sahoo S. K., Panda J. J.* The present and future of nanotechnology in human health care // *Clinical Nanomedicine*. 2007. P.20–31

2. Зорин В. П., Михаловский И. С., Зорина Т. Е., Черенкевич С. Н. Внутрилипосомальное распределение триметилового эфира хлорина е6 при изменении фазового состояния липидного бислоя // Биофизика. 1995. Том 40, вып.2. с. 328–333.
3. Кравченко И. Е., Зорин В. П. Солюбилизация C_{60} биологическими мембранами из различных синтетических фосфолипидов // «Низкоразмерные системы-2»: Сб. науч. работ. Гродно. 2002. С. 95–99
4. Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии / Пер. с англ. М., 1986.

НОВЫЙ ВИД ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ СО СМЕЩЕНИЯМИ ПРИ СКАЧКАХ

А. С. Чернухо, С. Я. Килин

Уравнение Фоккера-Планка является одним из наиболее часто используемых уравнений в современной физике. Классической областью его применения является Броуновское движение. Однако же за время своего существования это уравнение было неоднократно обобщено: сначала были добавлены дальние скачки (уравнение Колмогорова-Феллера или, что эквивалентно, Крамерса-Мояля), затем стали рассматривать многокомпонентные процессы (обобщенное уравнение Фоккера-Планка), перешли к системам с памятью (уравнение Фоккера-Планка в дробных производных). Эта работа рассматривает самый общий случай многокомпонентных Марковских процессов и является, таким образом, завершающей в их классификации.

На *рис. 1* изображена механическая интерпретация наиболее простой системы, проявляющей, тем не менее, новый вид динамики. Мы назвали ее пространственными смещениями при скачках. У этих смещений есть несколько особенностей. Во-первых, они не имеют характера диффузии. В отличие от последней, где для достижения конечного смещения нужен конечный интервал времени, смещения происходят мгновенно во время перехода системы из одного состояния в другое и могут перевести ее произвольно далеко от исходной точки. Во-вторых, ка-

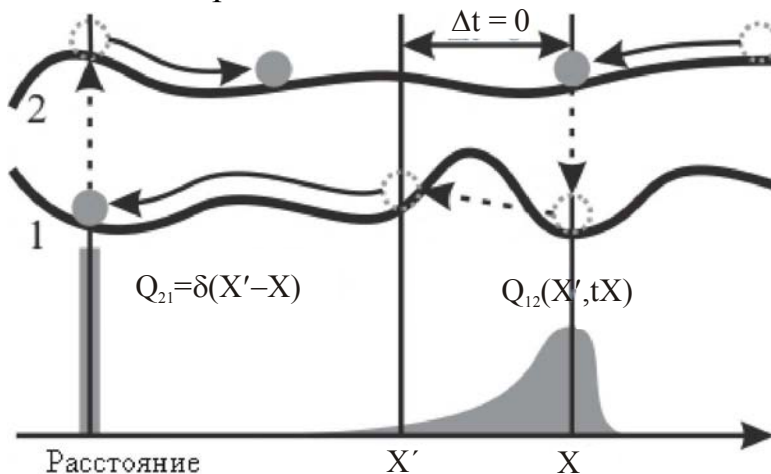


Рис. 1. Механическая интерпретация системы со смещениями при скачках.

Динамика на каждом уровне детерминистическая, смещения происходят только при переходах со второго уровня на первый.
Серая заливка распределения смещений