19

Тушение флуоресценции производных цианина 5.5 гибридными наноструктурами ядро–оболочка: вклады H-агрегации и поверхностного плазмонного резонанса

© В.О. Свинко[1], Е.В. Соловьева[1,¶]

[1] Институт химии Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

¶e-mail: e.solovieva@spbu.ru

Поступила в редакцию 06.07.2026 г.
В окончательной редакции 20.07.2026 г.
Принята к публикации 22.07.2026 г.

Описано взаимодействие двух цианиновых красителей с полидиаллилдиметиламмоний хлоридом. Исследуемые красители являются несульфированным и сульфированным N-гидроксисукцинимидными производными цианина 5.5, широко используемыми во флуоресцентном мечении биомолекул и наноструктур. Спектры поглощения и флуоресценции, зарегистрированные в растворах с различной концентрацией полимера, показали значимое влияние конформации полимера на агрегацию цианинов. Связывание производных цианина 5.5 с полидиаллилдиметиламмоний хлоридом также изучено на поверхности наночастиц типа ядро-оболочка. Используемые наноструктуры получены на основе золотых наностержней, покрытых четырьмя слоями полиэлектролитов, и охарактеризованы с помощью сканирующей электронной микроскопии и электрофоретического рассеяния света. Сравнительный анализ тушения флуоресценции цианинов в мономерном и агрегированном состояниях в дисперсии наночастиц позволил различить вклад в тушение, обусловленный металлическим ядром, и вклад, обусловленный агрегацией красителя на поверхности. Исследование демонстрирует важность установления режима самосборки молекул красителя на полимере при разработке гибридных люминесцентных наноструктур.

Ключевые слова: цианин, люминесценция, полидиаллилдиметиламмоний хлорид, агрегация, золотые наночастицы.

DOI: 10.61011/OS.2026.09.63822.9362-26

Введение

Плазмонные наночастицы благородных металлов имеют высокий потенциал для отдельных областей фотомедицины, таких как фототермическая и фотодинамическая терапия [1–3]. Для повышения коллоидной стабильности и биосовместимости металлических наночастиц прибегают к их покрытию оболочкой. Материалами покрытия чаще всего служат белки [4,5], биосовместимые полимеры [6,7] или оксид кремния [8]. Для возможности визуализации получаемых наноструктур ядро-оболочка в клетках и тканях проводят их мечение флуоресцентными красителями. Мечение флуорофорами осуществляется либо путем химической конъюгации, либо путем нековалентного связывания [9]. Для дисперсий наночастиц последний способ является предпочтительным, так как он более прост в реализации и не требует функционализации поверхности реакционноспособными группами [10].

Одними из наиболее широко используемых красителей в молекулярной биологии и биовизуализации являются цианины. Данный класс флуорофоров наиболее богат молекулами, возбуждаемыми и излучающими в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, что особенно важно для биологических применений. При использовании цианинов для нековалентного мечения гибридных наноструктур, в частности по типу ядро-оболочка, есть вероятность полной потери их флуоресцентного отклика не только за счет плазмонного ядра, но и вследствие агрегации красителя на поверхности [11]. Агрегация цианинов, как и многих других сопряженных полиароматических красителей, может протекать с образованием H-агрегатов или J-агрегатов. H-агрегаты представляют собой структуры с параллельной упаковкой молекул по типу стопки и характеризуются гипсохромным сдвигом полосы поглощения (поэтому их так и обозначают, от английского слова „hypsochromic“), а также значимым тушением флуоресценции вследствие запрета переходов из нижнего возбужденного состояния [12,13]. J-агрегаты (от английского „Jelly“) — это структуры, в которых молекулы имеют линейное расположение по типу „хвост к голове“, для них наблюдается батохромный сдвиг полосы поглощения, интенсивность эмиссии при этом возрастает и смещается в длинноволновую область вследствие экситонных взаимодействий [14,15]. Таким образом, при создании флуоресцирующих наноструктур H-агрегация молекулярных красителей относится к нежелательным процессам, в то время как их J-агрегация рассматривается как необходимый пререквизит для агентов био-

визуализации с откликом в области коротковолнового инфракрасного излучения (в англоязычной литературе обозначаемой как shortwave infrared (SWIR)). Избежать H-агрегации красителя на поверхности гибридных наноструктур можно за счет рационального сочетания красителя и материала покрытия. Таким образом, для золото-полимерных структур ядро-оболочка возникает необходимость знания режимов взаимодействия используемых цианинового производного и полимера, а также оптимизация условий адсорбции красителя из раствора.

Несмотря на множество работ, в которых рассмотрено нековалентное связывание цианиновых красителей с биологическими макромолекулами, такими как альбумины [16–20] или ДНК [21–25], многие синтетические полимеры, которые также широко используются при создании биосовместимых покрытий, остались вне фокуса исследователей. В частности, к таким полимерам относится полидиаллилдиметиламмоний хлорид (ПДАДМАХ), который активно применяется при изготовлении микрокапсул [26] и в методе послойной адсорбции (англоязычный термин „layer-by-layer“) [27,28], но имеются лишь разрозненные данные о его взаимодействии с цианиновыми красителями в водных средах [29–31]. Поэтому в настоящей работе проведено спектральное исследование связывания двух производных цианина 5.5 с ПДАДМАХ как в растворе, так и на поверхности золотых наночастиц. Выбор разных по типу цианинов (несульфированный и сульфированный NHS-эфиры) позволил провести сравнительный анализ тушения их флуоресценции гибридными наноструктурами, благодаря которому удалось различить вклады от H-агрегации на полимерной оболочке и от плазмонного резонанса металлического ядра.

Методика эксперимента

Материалы и реактивы

Тетрахлороаурат(III) водорода (Alfa Aesar, 99%), нитрат серебра (Sigma-Aldrich, 99%), борогидрид натрия (Sigma-Aldrich, 99%), аскорбиновая кислота (Sigma-Aldrich, 99%), цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ) (Sigma-Aldrich, 95%), полидиаллилдиметиламмоний хлорид (ПДАДМАХ) (Sigma-Aldrich, 95%), $Mw \approx 50000$ g/mol, полистиролсульфонат натрия (ПСС) (Sigma-Aldrich, 95%), $Mw \approx 70000$ g/mol, цианиновые красители (Lumiprobe, 95%) использовались в исходном виде. Все растворы готовили на деионизированной воде с сопротивлением 18.2 MΩ·cm (Milli-Q Reference, Millipore).

Синтез и покрытие наночастиц золота

Стержнеобразные наночастицы золота (НЧЗ) синтезированы по методу наращивания зерен. Затравочный раствор получали путем смешивания 0.25 mL 10 mM раствора тетрахлороаурата водорода с 7.5 mL 0.1 M раствора ЦТАБ, после чего добавляли 0.60 mL 10 mM ледяного раствора борогидрида натрия. Далее затравочный раствор помещали в термостатированную водяную баню и выдерживали при 30°C в течение 2 h. Раствор роста представлял собой смесь 47.5 mL 0.10 M ЦТАБ, 2 mL 10 mM тетрахлороаурата водорода, 0.32 mL 0.1 M аскорбиновой кислоты и 0.25 mL 10 mM нитрата серебра. Через несколько минут после добавления 0.1 mL затравочного раствора к раствору роста наблюдалось изменение цвета, указывающее на образование золотых наностержней. Дисперсию золотых наностержней очищали от избытка ЦТАБ двойным центрифугированием в течение 20 min при 9000 rpm.

Покрытие НЧЗ полимерной оболочкой проводили послойным методом, описанным в работе [32]. Каждый слой наносили одинаковым образом: дисперсию НЧЗ добавляли по каплям в раствор полимера с концентрацией 2 g/L в равном объеме при интенсивном перемешивании и перемешивали в течение 2 h. Затем смесь центрифугировали в течение 30 min при 8000 rpm, надосадочную жидкость сливали, осадок ресуспендировали в воде до половины объема. После нанесения последнего полимерного слоя проводили двукратную центрифужную очистку.

Приготовление растворов краситель-полимер и дисперсий краситель–наночастицы

Взаимодействие цианинов с ПДАДМАХ изучалось при постоянной концентрации красителя, равной 1 μM и различной концентрации полимера ($5 \cdot 10^{-4}$–2 g/L). Растворы готовили путем добавления раствора красителя с концентрацией 0.1 mM в раствор полимера с соответствующей концентрацией в объемном соотношении 1 : 99. Взаимодействие цианинов с наноструктурами ядро-оболочка также изучалось при постоянной концентрации красителя (1 μM) и различной концентрации покрытых наночастиц, выраженной в массовой концентрации золота (0.5–20 mg/L). Образцы готовили путем добавления 0.1 mM раствора красителя в дисперсию наночастиц с соответствующей концентрацией в объемном соотношении 1 : 99. Все приготовленные растворы и дисперсии перемешивали в течение примерно 5 min при комнатной температуре перед проведением спектральных измерений.

Оборудование

Спектры поглощения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах регистрировали на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu) с разрешением 1 nm. Все спектры измерялись при комнатной температуре в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 cm. Спектры флуоресценции регистрировались на спектрометре Fluoromax (Horiba). Длина волны возбуждения составляла 684 nm для несульфированного цианина и 673 nm для сульфированного цианина. Дзета-потенциал измеряли методом ла-

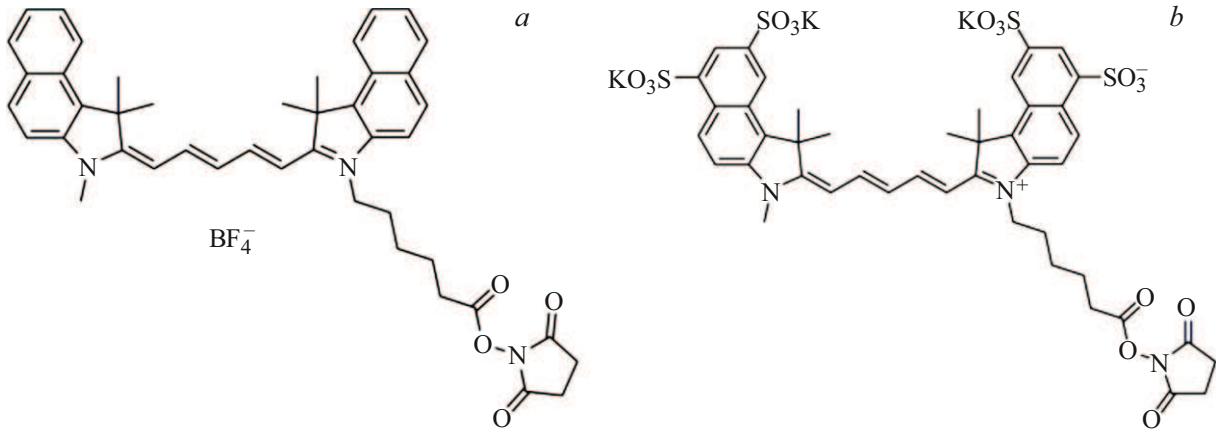


Рис. 1. Молекулярные структуры несульфированного (a) и сульфированного (b) цианин 5.5 NHS-эфира.

зерного доплеровского микроэлектрофореза с помощью прибора Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd.). Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проводилась на микроскопе Zeiss Merlin (Carl Zeiss, Germany) при ускоряющем напряжении 15 kV. СЭМ-изображения получены из трех случайных областей образца. Для подготовки образца к СЭМ-анализу 10 μL дисперсии наноструктур наносили капельным методом на углеродную пленку и высушивали на воздухе. Атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) для определения массовой концентрации золота проводили с помощью спектрометра ICPE-9000 (Shimadzu).

Результаты и обсуждение

Полиэлектролиты зачастую выступают инициаторами агрегации полиароматических молекул. Поэтому первый этап работы состоял в оценке взаимодействия изучаемых производных цианина 5.5, структуры которых приведены на рис. 1, c используемым для покрытия полимером ПДАДМАХ в растворе. Спектры поглощения и флуоресценции водных растворов с постоянной концентрацией несульфированного (обозначаемого далее как Cy5.5-NHS) и сульфированного (обозначаемого далее как s-Cy5.5-NHS) N-гидроксисукцинимидных производных цианина 5.5 и варьируемой концентрацией ПДАДМАХ представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Как можно видеть, несульфированный и сульфированный красители демонстрируют совершенно разное поведение при взаимодействии с полимером. В случае Cy5.5-NHS трансформаций контура спектра поглощения не наблюдается, как и существенного изменения интенсивности флуоресценции во всем диапазоне концентраций ПДАДМАХ, что говорит об отсутствии агрегирующего эффекта на молекулы красителя со стороны полиэлектролита.

Для s-Cy5.5-NHS, напротив, наблюдаются существенные изменения контура спектров поглощения и интенсивности спектров флуоресценции, которые задаются концентрацией ПДАДМАХ. При наиболее низкой концентрации полимера в растворе ($5 \cdot 10^{-4}$ g/L) выраженное плечо на длине волны 594 nm и минимальная интенсивность основной полосы с максимумом 677 nm в спектре поглощения свидетельствуют об H-агрегации s-Cy5.5-NHS, при этом флуоресценция s-Cy5.5-NHS практически полностью потушена. При увеличении концентрации ПДАДМАХ в растворе контур спектра поглощения s-Cy5.5-NHS восстанавливается до типичного для его мономерной формы (две полосы поглощения с максимумами 630 и 677 nm). В спектрах флуоресценции наблюдается небольшой сдвиг в длинноволновую область максимума полосы эмиссии, а её интенсивность значимо возрастает. При концентрации ПДАДМАХ 0.75 g/L интенсивность флуоресценции достигает значения, характерного для раствора красителя без добавок. Подобные спектральные изменения говорят о переходе s-Cy5.5-NHS из H-агрегатов в мономерную форму.

Ввиду того, что концентрация полимера является фактором, определяющим как его собственную конформацию в растворе, так и наблюдаемые изменения в спектрах s-Cy5.5-NHS, очевидно, что агрегация красителя задается именно конформацией ПДАДМАХ в растворе. При низкой массовой концентрации ПДАДМАХ, будучи гибкоцепным полиэлектролитом, имеет развернутую конформацию статистического клубка, на которой молекулам s-Cy5.5-NHS удобно собираться в H-агрегаты. С ростом концентрации ПДАДМАХ приобретает все более свернутую конформацию, распределение зарядов в которой уже не способствует агрегации красителя и приводит к связыванию макромолекулы с его мономерами. Полученная кривая распада H-агрегатов s-Cy5.5-NHS (рис. 3, c) хорошо согласуется с прогрессивным характером сворачивания линейных поликатионитов в отсутствие ионных добавок [33].

Понимание режимов взаимодействия NHS-эфиров цианина 5.5 с ПДАДМАХ в растворе позволило перейти

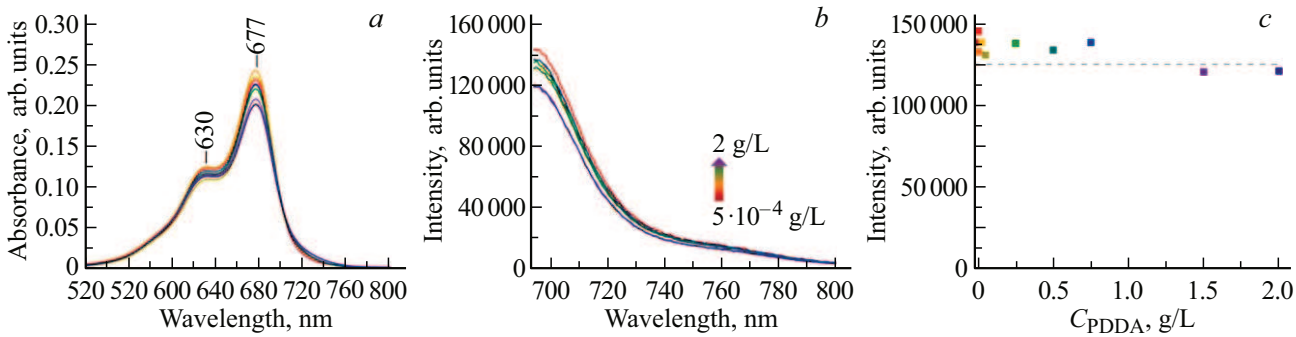


Рис. 2. Спектры поглощения (*a*) и флуоресценции (*b*) цианин 5.5 NHS-эфира в растворах ПДАДМАХ с варьируемой концентрацией полимера. График зависимости пиковой интенсивности флуоресценции от концентрации ПДАДМАХ (*c*). Штриховая линия соответствует интенсивности флуоресценции водного раствора красителя без добавок.

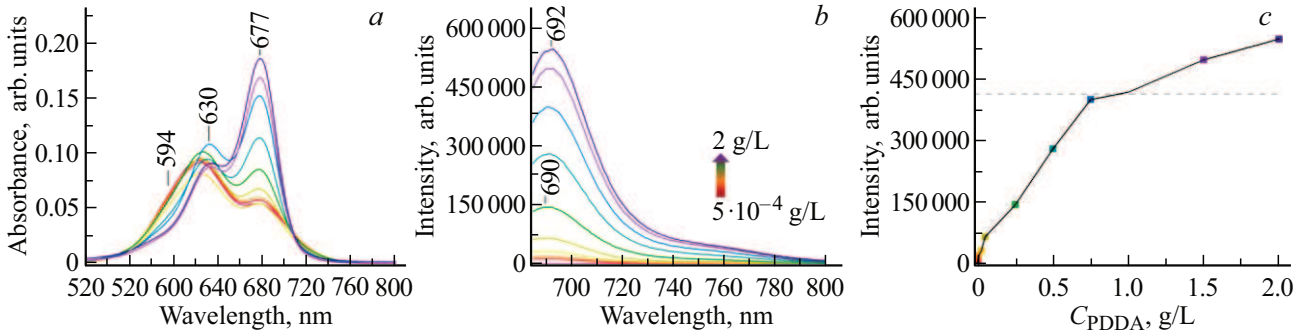


Рис. 3. Спектры поглощения (*a*) и флуоресценции (*b*) сульфо-цианин 5.5 NHS-эфира в растворах ПДАДМАХ с варьируемой концентрацией полимера. График зависимости пиковой интенсивности флуоресценции от концентрации ПДАДМАХ (*c*). Штриховая линия соответствует интенсивности флуоресценции водного раствора красителя без добавок.

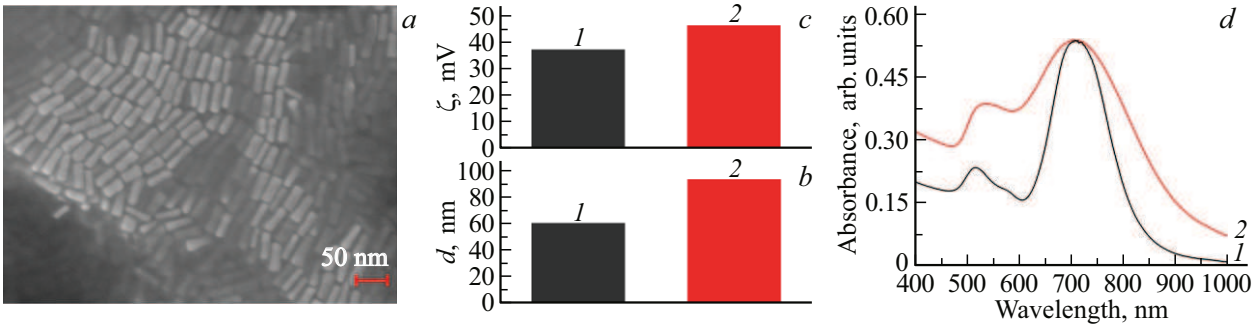


Рис. 4. СЭМ-изображение синтезированных НЧЗ (*a*), гидродинамический диаметр (*b*), дзета-потенциал (*c*) и нормированные на пиковую интенсивность спектры поглощения (*d*) НЧЗ до (*1*) и после (*2*) покрытия полимерной оболочкой.

к исследованию спектрального отклика красителей в более сложных системах — в дисперсиях плазмонных наноструктур ядро-оболочка. Для этого были получены НЧЗ с полимерным покрытием. Как видно из представленного на рис. 4, *a* СЭМ-изображения, для приготовления гибридных наноструктур использовались стержнеобразные НЧЗ со средним аспектным соотношением 3.1. Данные наночастицы поглощают излучение в области 640–840 nm с максимумом на длине волны 715 nm, что хорошо соотносится с областью поглощения и эмиссии цианина 5.5. Исходные наночастицы были покрыты полимерной оболочкой, состоящей из четырех слоев полиэлектролитов, последним из которых выступал ПДАДМАХ. Об успешности нанесения покрытия судили по увеличению гидродинамического диаметра наночастиц (рис. 4, *b*) и увеличению значения дзета-потенциала поверхности (рис. 4, *c*). Спектры поглощения дисперсии НЧЗ, зарегистрированные до и после их покрытия, показали, что средний размер металлического ядра остался без существенных изменений, несмотря на небольшой рост полидисперсности (рис. 4, *d*). Полученные наноструктуры ядро-оболочка обозначены как

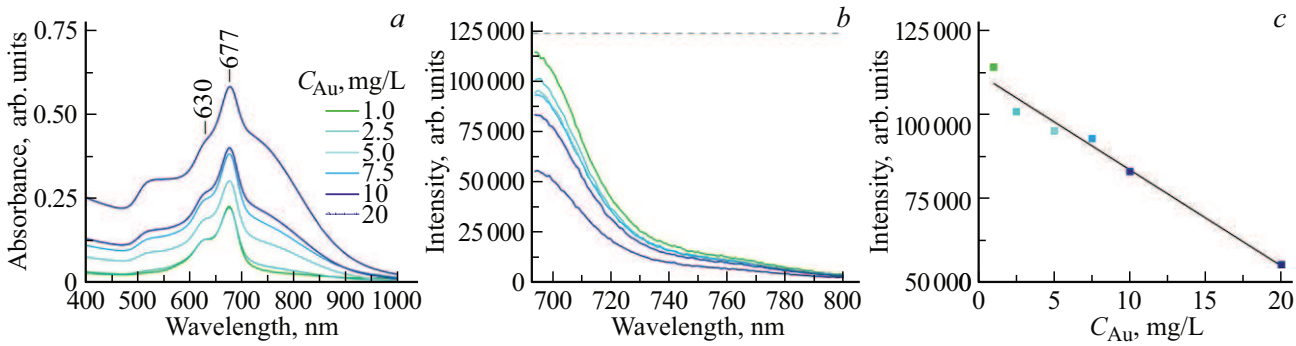


Рис. 5. Спектры поглощения (*a*) и флуоресценции (*b*) цианин 5.5 NHS-эфира в дисперсиях наноструктур НЧЗ@ПДАДМАХ с варьируемой концентрацией наночастиц. График зависимости пиковой интенсивности флуоресценции от концентрации наночастиц (*c*).

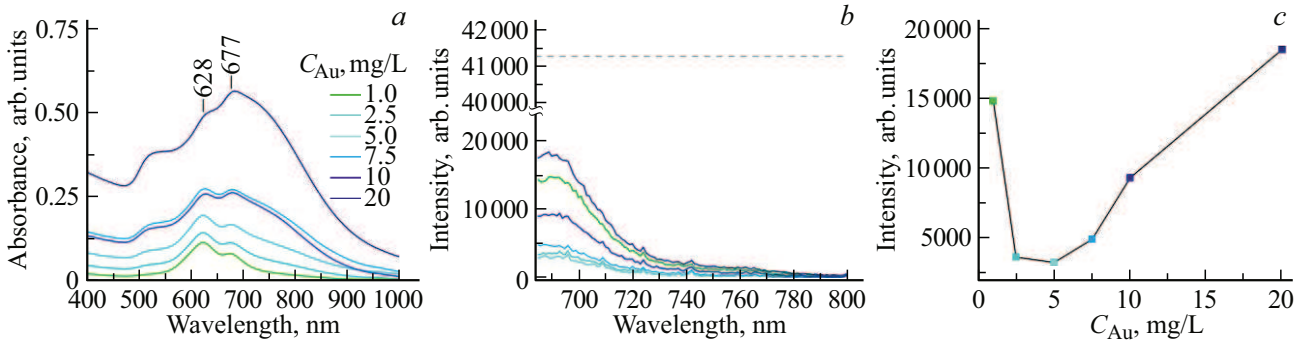


Рис. 6. Спектры поглощения (*a*) и флуоресценции (*b*) сульфо-цианин 5.5 NHS-эфира в дисперсиях наноструктур НЧЗ@ПДАДМАХ с варьируемой концентрацией наночастиц. График зависимости пиковой интенсивности флуоресценции от концентрации наночастиц (*c*).

НЧЗ@ПДАДМАХ для удобства дальнейшего обсуждения.

Спектры поглощения и флуоресценции несульфированного и сульфированного NHS-эфиров цианина 5.5 в дисперсии НЧЗ@ПДАДМАХ при варьируемой концентрации наночастиц представлены на рис. 5 и 6 соответственно. Спектры поглощения Cy5.5-NHS, так же как и в случае растворов с ПДАДМАХ, не содержат признаков агрегации красителя во всем диапазоне используемых концентраций наночастиц. Необходимо отметить лишь общий рост поглощения в области 500–900 nm за счет добавляемых наночастиц, при этом относительная интенсивность полос красителя с максимумами 630 и 677 nm остается без изменений. Однако в спектрах эмиссии наблюдается постепенное падение интенсивности, которое, очевидно, связано с плазмонным тушением флуоресценции красителя наночастицами. График зависимости интенсивности эмиссии от концентрации частиц имеет линейный характер, что подтверждает наличие только одного фактора, ответственного за тушение флуоресценции цианина.

Спектры поглощения сульфированного NHS-эфира цианина 5.5 в дисперсии НЧЗ@ПДАДМАХ имеют профиль, в котором коротковолновая полоса красителя смещена в синюю область на 7 nm и имеет интенсивность выше, чем основная полоса с максимумом 677 nm. Однако необходимо отметить, что относительная интенсивность полосы 677 nm немного возрастает при концентрациях по атомарному золоту выше 5 mg/L. Зависимость интенсивности флуоресценции s-Cy5.5-NHS от концентрации НЧЗ@ПДАДМАХ имеет сложный характер. В первую очередь необходимо отметить гораздо более сильное тушение флуоресценции сульфированного цианина. Кроме того, следует подчеркнуть немонотонный характер изменения интенсивности флуоресценции: ее резкое падение, происходящее при изменении концентрации с 1 на 2.5 mg/L по атомарному золоту, сменяется планомерным ростом при дальнейшем повышении концентрации. Зарегистрированные спектры однозначно свидетельствуют об H-агрегации красителя на поверхности наноструктур. Однако наблюдающаяся тенденция изменения их профиля и интенсивности, говорит о появлении мономеров s-Cy5.5-NHS при концентрации НЧЗ@ПДАДМАХ по атомарному золоту выше 5 mg/L и их дальнейшем нарастающем содержании. Таким образом, можно предположить, что в области очень низких концентраций наноструктур они выступают в роли центров агрегации красителя, однако

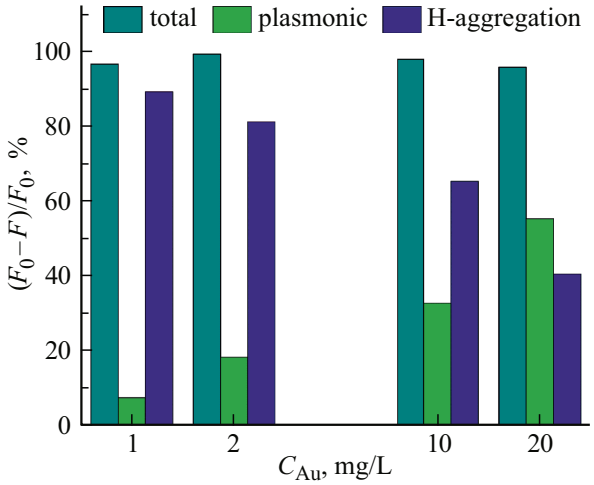


Рис. 7. Вклады поверхностного плазмонного резонанса и H-агрегации в общее тушение флуоресценции сульфо-цианин 5.5 NHS-эфира.

при увеличении площади доступной поверхности красителю выгоднее распределяться на ней в мономерной форме.

Плазмонное тушение флуоресценции молекулярных красителей определяется прежде всего степенью перекрытия области поверхностного плазмонного резонанса наночастиц с областью возбуждения и эмиссии флуорофора. Так как исследуемые NHS-эфиры цианина 5.5 имеют практически совпадающие диапазоны возбуждения и эмиссии, то сопоставительный анализ степени тушения их флуоресценции в дисперсии наноструктур открывает возможность провести оценку отдельных вкладов от H-агрегации и поверхностного плазмонного резонанса для s-Cy5.5-NHS. С этой целью, согласно выражению $(F_0 - F)/F_0 \times 100\%$, где F_0 и F — интенсивность флуоресценции цианина в воде и в дисперсии НЧЗ соответственно, было рассчитано общее тушение флуоресценции (относительно водного раствора соответствующего цианина) при каждой концентрации наночастиц. Исходя из предположения о сопоставимом вкладе плазмонного тушения для обоих цианинов, вклад в тушение от H-агрегации рассчитывался как разность между общим тушением флуоресценции s-Cy5.5-NHS и Cy5.5-NHS. Наиболее наглядным является сравнение результатов, полученных для двух наиболее низких и двух наиболее высоких концентраций наночастиц, когда наблюдаются самые существенные изменения интенсивности флуоресценции s-Cy5.5-NHS (рис. 7).

Как видно, тушение флуоресценции s-Cy5.5-NHS значительно и составляет 95-99% во всем исследуемом диапазоне концентраций наночастиц. H-агрегация обеспечивает 89 и 81% тушения флуоресценции s-Cy5.5-NHS для дисперсий с массовым содержанием золота 1 и 2 mg/L, в то время как вклад от поверхностного плазмонного резонанса в них составляет всего 7 и 18% соответственно. В дисперсии наночастиц с концентрациями по атомарному золоту 10 и 20 mg/L вклад в тушение флуоресценции s-Cy5.5-NHS от поверхностного плазмонного резонанса значительно увеличивается, причем не только вследствие роста содержания НЧЗ@ПДАДМАХ, но и вследствие частичного перехода H-агрегатов в мономеры. Таким образом, основной причиной тушения флуоресценции сульфированного NHS-эфира цианина 5.5 в дисперсиях НЧЗ@ПДАДМАХ является H-агрегация. Однако наиболее интересно, что H-агрегация даёт не постоянный вклад, который, казалось бы, должен быть вследствие сформированности конформации полимера на поверхности металла, а вклад также зависящий от концентрации наноструктур в дисперсии.

Выводы

Полученные спектральные данные демонстрируют, что режим взаимодействия производных цианина 5.5 с полидиаллилдиметиламмоний хлоридом определяется их зарядовым состоянием и конформацией полимера в растворе. Для сульфированного NHS-эфира цианина 5.5 установлена выраженная H-агрегация на макромолекулах ПДАДМАХ, когда они имеют развернутую конформацию статистического клубка, и связывание с полимером в мономерной форме, когда он находится в растворе в свернутой конформации.

Исследование цианинов в дисперсии золото-полимерных наноструктур ядро-оболочка показало, что H-агрегация также может происходить на их поверхности. Для сульфированного цианина 5.5 её вклад в тушение флуоресценции превосходит вклад в тушение от поверхностного плазмонного резонанса. Однако выявлен частичный переход сульфированного красителя в мономерную форму при увеличении концентрации наноструктур в дисперсии. Данный факт может быть использован при оптимизации условий нековалентного мечения флуоресцентными красителями гибридных наноструктур.

Благодарности

Авторы благодарят Ресурсные центры СПбГУ: „Оптические и лазерные методы исследования вещества“, „Методы анализа состава вещества“, „Междисциплинарный центр нанотехнологии“ и „Физические методы исследования поверхности“.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-73-10052-П).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] A.B. Bucharskaya, N.G. Khlebtsov, B.N. Khlebtsov, G.N. Maslyakova, N.A. Navolokin, V.D. Genin, E.A. Genina, V.V. Tuchin. Materials, **15** (4), 1606 (2022). DOI: 10.3390/ma15041606

[2] В.О. Свинко, А.И. Шевчук, А.Н. Смирнов, Д.В. Макеева, Е.В. Соловьева. Опт. и спектр., **130** (10), 150 (2022). DOI: 10.21883/OS.2022.10.53631.3709-22 [V.O. Svinko, A.I. Shevchuk, A N. Smirnov, D.V. Makeeva, E.V. Solovyeva. Opt. Spectrosc., **130** (10), 1590 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.10.54872.3709-22].

[3] A.A. Obalola, H. Abrahamse, S.S. Dhilip Kumar. Nanoscale Advances, **7** (23), 7440 (2025). DOI: 10.1039/d5na00767d

[4] P. Sanpui, A. Paul, A. Chattopadhyay. Nanoscale, **7** (44), 18411 (2015). DOI: 10.1039/c5nr05805h

[5] S.M.H. AL-Jawad, A.A. Taha, M.M.F. Al-Halbosiy, L.F.A. AL-Barram. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, **21**, 201 (2018). DOI: 10.1016/j.pdpdt.2017.12.004

[6] M. Dhara. J. Macromol. Sci. A: Pure Appl. Chem., **60** (12), 841 (2023). DOI: 10.1080/10601325.2023.2271040

[7] I. Capek. Adv. Colloid Interface Sci., **249**, 386 (2017). DOI: 10.1016/j.cis.2017.01.007

[8] A.N. Smirnov, S.F. Aslanov, D.V. Danilov, O.Y. Kurapova, E.V. Solovyeva. Nanomaterials, **13**, 1267 (2023). DOI: 10.3390/nano13071267

[9] А.И. Деменьшин, Е.В. Соловьева. Усп. химии, **94** (6), 1 (2025). DOI: 10.59761/RCR5169 [A.I. Demenshin, E.V. Solovyeva. Russ. Chem. Rev., **94** (6), RCR5169 (2025). DOI: 10.59761/RCR5169].

[10] В.О. Свинко, Е.В. Соловьева. Оптический журнал, **91** (11), 91 (2024). DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-11-91-99 [V.O. Svinko, E.V. Solovyeva. J. Opt. Technol., **91** (11), 765 (2024). DOI: 10.1364/JOT.91.000765].

[11] Б.И. Шапиро, Е.С. Тышкунова, А.Д. Кондорский, В.С. Лебедев. Квант. электрон., **45** (12), 1153 (2015) [B.I. Shapiro, E.S. Tyshkunova, A.D. Kondorskiy, V.S. Lebedev. Quantum Electron., **45** (12), 1153 (2015). DOI: 10.1070/QE2015v045n12ABEH015869].

[12] N.J. Hestand, F.C. Spano. Chem. Rev., **118** (15), 7069 (2018). DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00581

[13] Н.В. Белько, М.П. Самцов, А.А. Луговский. Опт. и спектр., **128** (11), 1627 (2020). DOI: 10.21883/OS.2020.11.50165.84-20 [N.V. Belko, M.P. Samtsov, A.A. Lugovski. Opt. Spectrosc., **128** (11), 1758 (2020). DOI: 10.1134/S0030400X20110053].

[14] F. Würthner, T.E. Kaiser, C.R. Saha-Möller. Angew. Chem. Int. Ed., **50** (15), 3376 (2011). DOI: 10.1002/anie.201002307

[15] С.С. Моритака, В.С. Лебедев. Письма в ЖЭТФ, **118** (11), 794 (2023). DOI: 10.31857/S1234567823230027

[16] P.G. Pronkin, L.A. Shvedova, A.S. Tatikolov. J. Chem. Sci., **132** (1), 152 (2020). DOI: 10.1007/s12039-020-01858-2

[17] Y.Z. Zhang, Q.F. Yang, H.Y. Du, Y.L. Tang, G.Z. Xu, W.P. Yan. Chin. J. Chem., **26**, 397 (2008). DOI: 10.1002/cjoc.200890076

[18] M. Saikiran, D. Sato, S.S. Pandey, T. Ohta, S. Hayase, T. Kato. Dyes Pigm., **140**, 6 (2017). DOI: 10.1016/j.dyepig.2017.01.015

[19] A.S. Tatikolov, I.G. Panova. High Energy Chem., **48** (2), 87 (2014). DOI: 10.1134/S0018143914020106

[20] A.S. Kashin, A.S. Tatikolov. High Energy Chem., **43** (6), 480 (2009). DOI: 10.1134/S0018143909060113

[21] Y. Kawabe, S. Kato. Dyes Pigm., **95** (3), 614 (2012). DOI: 10.1016/j.dyepig.2012.07.002

[22] P.G. Pronkin, O.N. Sorokina, A.S. Tatikolov. Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc., **320**, 124611 (2024). DOI: 10.1016/j.saa.2024.124611

[23] B.A. Armitage. Top. Curr. Chem., **253**, 55 (2005). DOI: 10.1007/b100442

[24] K.M. Sovenyhazy, J.A. Bordelon, J.T. Petty. Nucleic Acids Res., **31** (10), 2561 (2003). DOI: 10.1093/nar/gkg363

[25] R.A. Garoff, E.A. Litzinger, R.E. Connor, I. Fishman, B.A. Armitage. Langmuir, **18** (16), 6330 (2002). DOI: 10.1021/la025742f

[26] W. Song, Q. He, H. Möhwald, Y. Yang, J. Li. J. Contr. Release, **139** (2), 60 (2009). DOI: 10.1016/j.jconrel.2009.06.010

[27] A. Escobar, N. Muzzio, S.E. Moya. Pharmaceutics, **13** (1), 16 (2021). DOI: 10.3390/pharmaceutics13010016

[28] J.E. Wong, W. Richtering. Prog. Colloid Polym. Sci., **133**, 45 (2006). DOI: 10.1007/2882_056

[29] C. Estevez-Varela, J.N. Gama, M. Castillo, A. Miranda, P.A.A. De Beule, J. Perez-Juste, M. Lopez-Garcia, I. Pastoriza-Santos, S. Nunez-Sanchez. Adv. Opt. Mater., **13** (34), e02346 (2025). DOI: 10.1002/adom.202502346

[30] Е.В. Кортунова, Е.Е. Махаева, В.А. Смирнов, А.Р. Хохлов. Высокомолек. соед. А, **45** (2), 307 (2003) [E.V. Kortunova, E.E. Makhaeva, V.A. Smirnov, A.R. Khokhlov. Polym. Sci. Ser. A, **45** (2), 187 (2003)].

[31] K.A. Kuznetsov, T.V. Laptinskaya, Y.B. Mamaeva, E.A. Mamchits, E.E. Makhaeva, A.R. Khokhlov, B.I. Shapiro. Quantum Electron., **34** (10), 927 (2004). DOI: 10.1070/QE2004v034n10ABEH002912

[32] V.O. Svinko, A.N. Smirnov, A.I. Shevchuk, A.I. Demenshin, A.A. Smirnov, E.V. Solovyeva. Colloids Surf. B, **226**, 113306 (2023). DOI: 10.1016/j.colsurfb.2023.113306

[33] Е.А. Литманович, А.П. Орленева, Б.А. Королев, В.А. Касаикин, В.Г. Куличихин. Высокомолек. соед. А, **42** (6), 1035 (2000).