

УДК 543.426

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ СОСТАВА  
УГЛЕРОДНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ/НАНОЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ:  
СИНТЕЗ И СВОЙСТВА**

**Зобнина Е.А.** (ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»), **Подколюдная Ю.А.** (ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского») **Кокорина А.А.** (ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского») **Научный руководитель – доктор химических наук, профессор Горячева И.Ю.** (ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»)

Была разработана методика синтеза люминесцентных композитных наночастиц путем формирования углеродных наноструктур (УНС) на поверхности наночастиц диоксида кремния (НЧДК). Полученные композитные наночастицы были охарактеризованы методами абсорбционной, фотOLUMИНЕСЦЕНТНОЙ, ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ, ДИНАМИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА. Композиты обладают высоким квантовым выходом, фотостабильностью, монодисперсностью, коллоидной стабильностью, поэтому являются потенциальной перспективной меткой для иммунохимического анализа.

**Введение.** Интерес исследователей к синтезу УНС не теряет актуальности несколько десятилетий. Это обусловлено уникальными оптическими свойствами, биосовместимостью, низкой токсичностью, доступной стоимостью, многообразием подходов к получению углеродных наноструктур. В тоже время, известные способы синтеза УНС приводят к образованию полидисперсного продукта, содержащего, как правило, фрагменты полимерных структур и молекулярных флуорофоров. В результате исследователи сталкиваются с проблемой очистки и разделения продуктов синтеза. Популярными методами очистки и разделения (например, центрифугирование, диализ, горизонтальное геле-электрофоретическое разделение, эксклюзионная хроматография и так далее) часто оказываются трудоемкими, малоэффективными и дорогостоящими. Для решения описанной проблемы мы предлагаем использовать носитель для УНС. Наночастицы диоксида кремния являются соответствующими кандидатами, выполняющими роль носителя, поскольку оптически прозрачны, термодинамически и химически стабильны в различных средах, биоразлагаемы, имеют большую площадь поверхности и обилие функциональных групп. В ходе синтеза НЧДК существует возможность контроля размера, полидисперсности, а также модификации поверхности наночастицы силанами, содержащими функциональные группы необходимые для формирования композита.

**Основная часть.** В рамках данной работы была разработана методика синтеза люминесцентных композитов состава углеродные наноструктуры/наночастицы диоксида кремния. Первоначально, методом обратной микроэмульсии были синтезированы наночастицы диоксида кремния, поверхность которых была модифицирована одновременно карбоксильными и аминогруппами. Раствор с диспергированными НЧДК и лимонной кислотой подвергали гидротермальному синтезу с получением люминесцентного продукта. Предполагается, что на поверхности наночастиц диоксида кремния формируется флуорофор 1,2,3,5-тетрагидро-5-оксо-, имидазо[1,2-а]пиридин-7-карбоновая кислота (ИПКК).

На спектре поглощения полученных композитных наночастиц наблюдается пик в области 360 нм, что, вероятно, соответствует переходам  $\pi \rightarrow \pi^*$  или  $n \rightarrow \pi^*$ . Наибольшая интенсивность люминесценции наблюдается в области 450 нм при возбуждении длиной волны 350 нм. Важно отметить, что спектральные характеристики молекулярного флуорофора ИПКК аналогичны спектральным характеристикам представленных композитов, что может являться косвенным

доказательством формирования флуорофора на поверхности носителя. Квантовый выход полученных композитов составил  $(66\pm 2)\%$ .

Методами динамического рассеяния света был определен гидродинамический диаметр полученных структур, он составил  $(43\pm 2)$  нм, индекс полидисперсности –  $0,17\pm 0,01$ , дзета-потенциал –  $(-27\pm 2)$  мВ, что характеризует частицы, как умеренно стабильные.

Для доказательства формирования молекулярного флуорофора ИПКК на поверхности НЧДК мы использовали возможности метода Фурье-ИК- спектроскопии. На ИК-спектре полученных композитов наблюдается полоса при  $800\text{ см}^{-1}$ , которая отвечает за симметричные валентные колебания Si–O–Si, а также широкая полоса при  $1080\text{--}1120\text{ см}^{-1}$ , которая соответствует асимметричным валентным колебаниям Si–O–Si. ИК-спектры молекулярного флуорофора ИПКК и люминесцентных композитных наночастиц имеют схожий профиль. Предполагается, что широкая интенсивная полоса в области  $3600\text{--}3300\text{ см}^{-1}$  соответствует валентным колебаниям O–H и N–H групп; в области  $1680\text{ см}^{-1}$  наблюдается полоса, которая, вероятно, отвечает валентным колебаниям карбонильной группы; две полосы в области  $1650\text{ см}^{-1}$  и  $1540\text{ см}^{-1}$  отвечают деформационным колебаниям N–H группы; а полоса в области  $1180\text{ см}^{-1}$  предположительно относится к валентным колебаниям C–N группы или деформационным колебаниям N–H группы.

**Выводы.** Получены люминесцентные композитные наночастицы, которые отвечают основным требованиям, предъявляемым к меткам для иммунохимического анализа: характеризуются высоким сигналом ФЛ; коллоидно- и химически- стабильны; поверхность наночастиц богата функциональными группами, необходимыми для последующей конъюгации.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ (№20-13-00195).

Зобнина Е.А. (автор)

Подпись

Горячева И.Ю. (научный руководитель)

Подпись