

## Заключение

С привлечением методов статических и динамических механических испытаний, а также реологической модели Прони исследованы вязкоупругие свойства 20-ти видов резин, используемых для изготовления различных деталей автомобильных шин. Верификация модели и проведенные расчеты показали ее применимость для характеристики шинных резин, как важного этапа проектирования указанных резинотехнических изделий.

## Литература

1. Хотько, А. В. Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности / А. В. Хотько, С. В. Шилько, С. Н. Бухаров // Мех. машин, механизмов и матер. – 2020. – № 4. – С. 11–18.
2. Кристенсен, Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1974. – 340 с.
3. Кравчук, А. С. Механика полимерных и композиционных материалов: учебное пособие / А. С. Кравчук, В. П. Майборода, Ю. С. Уржумцев. – М.: Наука, 1985. – 303 с.
4. Ghoreishy, H. R. Determination of the Parameters of the Prony Series in Hyper-Viscoelastic Material Models Using the Finite Element Method / H. R. Ghoreishy // Journal of Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 791–797.
5. Определение реологических параметров полимерных материалов на основе идентификации вязкоупругой модели Прони по результатам статических и динамических испытаний / С. В. Шилько [и др.] // Мех. машин, механизмов и матер. – 2017. – № 3. – С. 33–38.

**А. Д. Свечко**  
(БГУ, Минск)

Науч. рук. **Е. И. Коваленко**, канд. биол. наук, доцент

## **ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ ГРАФЕНОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ С ЛЮМИНОЛОМ И ОКИСЛИТЕЛЯМИ**

Графеновые квантовые точки (ГКТ) представляют собой новый тип углеродных наночастиц, состоящих из малого числа слоев графе-

на (до 10 слоев) и имеющие латеральный диаметр от 1 до 100 нм [1, 2]. ГКТ обладают стабильной фотолюминесценцией с максимумом испускания, положение которого определяется размером ГКТ. Для них характерна устойчивость к фотообесцвечиванию, механическая и химическая стабильность, а также биосовместимость (в отличие от токсичных полупроводниковых и металлических квантовых точек). В связи с этим рассматриваются перспективы применения ГКТ в различных областях физики, биологии и технологий, в частности, их использования в качестве флуоресцентных зондов, маркеров для визуализации и диагностики биоматериалов [1–4].

Свойства ГКТ, включая степень окисления поверхности, плотность поверхностного заряда, статус допирования, связывание с полимерами могут существенно различаться в различных условиях и средах [2]. Было показано, что флуоресценции ГКТ тушится ионами металлов  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , тринитрофенолом, нитровзрывчатыми веществами, в системе  $\text{H}_2\text{O}_2$ /пероксидаза хрена, на основании чего предложено создание микродатчиков для обнаружения данных соединений с помощью ГКТ [1, 3, 4]. Создаются различные модификации ГКТ со специфическими свойствами. Так, были разработаны наноконпозиты на основе легированных азотом ГКТ и  $\text{Cu(II)}$ , проявляющие пероксидазоподобную активность в системе люминол- $\text{H}_2\text{O}_2$  и вызывают хемилюминесценцию (ХЛ) [5]. Следует отметить, что ХЛ и флуоресценция (ФЛ) являются важными методами анализа различных химических и биологических систем.

Цель работы: изучить ФЛ и ХЛ при взаимодействии ГКТ с люминолом и окислителями  $\text{H}_2\text{O}_2$  и  $\text{OCl}^-$ .

В работе использованы реагенты: люминол, 30 % раствор  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaOCl}$ , водная суспензия ГКТ («Sigma-Aldrich»), остальные реагенты производства РБ. ГКТ имели высоту 1-2 нм и латеральный диаметр  $< 5$  нм. Исследования выполнены в буферном растворе Эрла при pH 7,3. ХЛ изучали с использованием хемилюминометра БХЛ-2 (кафедра бифизики, БГУ), включающего ФЭУ-39А, оснащенного аппаратно-программным комплексом получения и обработки данных «Unichrom» («Новые аналитические системы», РБ). При этом регистрировали кинетические зависимости интенсивности ХЛ. Исследования ФЛ и спектров поглощения проводили с применением спектрофлуориметра CM 2203 («СОЛАР», РБ).

ФЛ люминола характеризуется полосой испускания с двумя перекрывающимися пиками с максимумами при  $\lambda_{em}$  418 и 438 нм, при этом длинноволновой максимум в спектре возбуждения наблюдается

при  $\lambda_{ex}$  348 нм (рисунок 1, а). Выявлено, что ФЛ люминола сильно тушится в присутствии 50 мкг/мл ГКТ, при этом проявляется полоса флуоресценции ГКТ с максимумом при  $\lambda_{em}$  536-540 нм (рисунок 1, а).

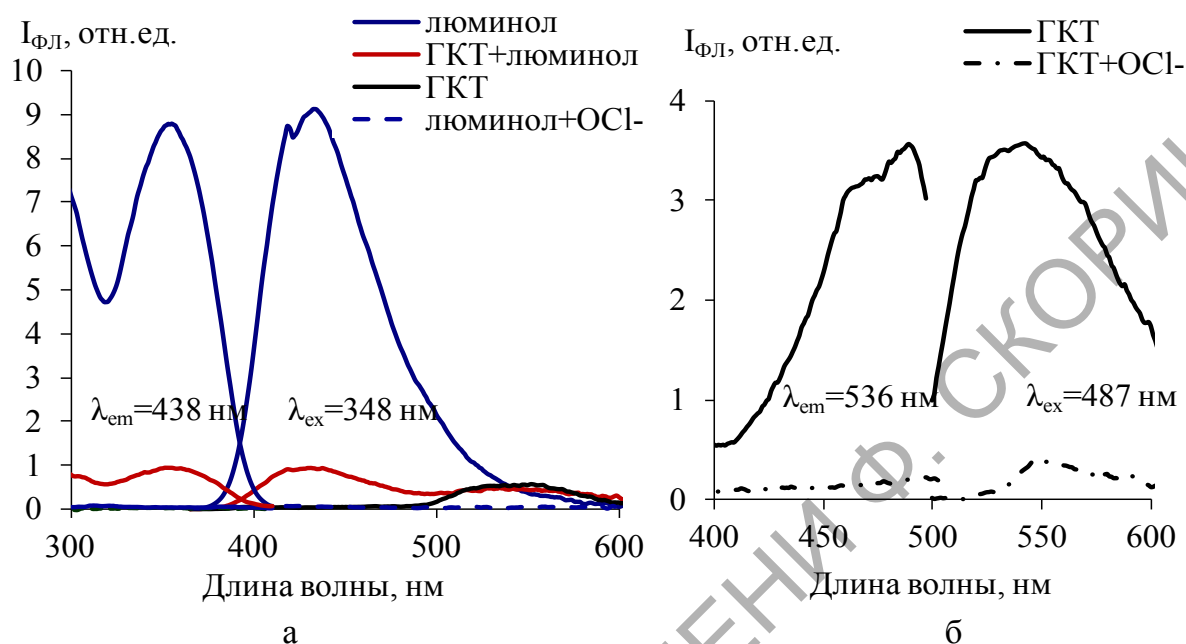


Рисунок 1 – Спектры ФЛ (возбуждения и испускания) для люминола (25 мкг/мл) и ГКТ (50 мкг/мл) в отсутствие и присутствии 0,1 ммоль/л  $OCl^-$

Установлено, что ГКТ, суспензированные в растворе Эрла, имеют максимум ФЛ при длине волны возбуждения  $\lambda_{ex}$  487 нм и длине волны испускания  $\lambda_{em}$  536 нм, полуширина полосы испускания составляет 89 нм (рисунок 1, б). Спектрофотометрический анализ показал, что спектры поглощения ГКТ и люминола аддитивны (рисунок 2).

Гипохлорит дозозависимым образом приводит к снижению оптической плотности и интенсивности ФЛ ГКТ и люминола вплоть до практически полного исчезновения полос при концентрации  $OCl^-$  0,1 ммоль/л (рисунок 1, 2). Реакция взаимодействия ГКТ с  $OCl^-$ , по-видимому, происходит через образование короткоживущих возбужденных интермедиатов, поскольку при этом регистрируется кратковременная интенсивная вспышка ХЛ, как в отсутствие, так и в присутствии люминола.

$H_2O_2$  не влияет на спектры поглощения и ФЛ люминола и незначительно снижает интенсивность ФЛ ГКТ. ХЛ, вызванная окислением люминола  $H_2O_2$ , усиливается после добавления ГКТ.

Таким образом, ГКТ значительно снижают интенсивность ФЛ люминола в отсутствие и присутствии  $H_2O_2$  или  $OCl^-$ . Однако ГКТ

оказывают различного типа влияние на ХЛ люминола при химической реакции его взаимодействия с  $H_2O_2$  или ОСГ. Выявленные эффекты могут быть следствием каталитического окисления люминола  $H_2O_2$  под действием использованных ГКТ.

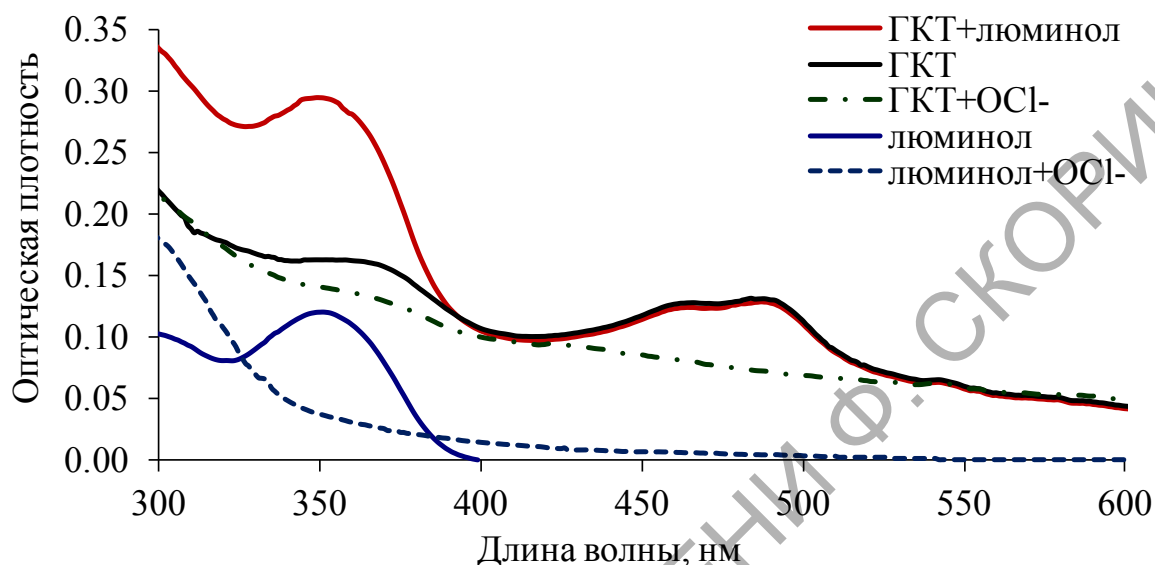


Рисунок 2 – Спектры поглощения для ГКТ (50 мкг/мл) и люминола (25 мкг/мл)

### Литература

1. Kumara, Y. R. Graphene quantum dot based materials for sensing, bio-imaging and energy storage applications: a review / Y. R. Kumara, et al. // RSC Adv. – 2020. – V.10. – P. 2386–23898.
2. Chauhan, N. Graphene based biosensors-accelerating medical diagnostics to new-dimensions / N. Chauhan, T. Maekawa, D. N. S. Kumar // J. Mater. Res. – 2017. – V. 32. – P. 2860–2882.
3. Mastar, A. A. An optical sensor based on graphene quantum dots for hydrogen peroxide detection / A. A. Mastar, J. Abdullah, N. A. Yusof, Y. W. Fen // Malays. J. Analyt. Sci. – 2019. – V. 23, N. 4. – P. 572–579.
4. Liang, L. A review on the cytotoxicity of GQDs: from experiment to simulation / L. Liang // Nanoscale Adv. – 2021. – P. 1.
5. Khan, P. Luminol-based chemiluminescent signals: clinical and non-clinical application and future uses / P. Khan, et al. // Appl. Biochem. Biotechnol. 2014. – V. 173, N2. – P. 333–355.