

## **Количественная характеристика внутренней структуры мембран из оксида графена по данным метода спинового зонда и сканирующей электронной микроскопии**

*Чумакова Н.А.*<sup>1,2</sup>, *Матвеев М.В.*<sup>1,2</sup>, *Марнаутов Н.А.*<sup>3</sup>

*harmonic2011@yandex.ru*

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Химический факультет

<sup>3</sup> Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН

Мембраны из оксида графена (МОГ) представляют собой слоистые материалы, состоящие из графеновых слоев, несущих кислородосодержащие группы (гидроксильные, эпоксидные, карбонильные, карбоксильные). Высокая селективность проницаемости МОГ для жидкостей и газов [1], как полагают, определяется внутренней структурой мембраны, а именно, ориентационной упорядоченностью оксиграфеновых слоев [2, 3] и степенью их изогнутости [4]. До настоящего времени упорядоченность МОГ определяли качественно (визуально) на основании микрофотографий СЭМ боковой поверхности мембраны. Данный подход позволяет оценить упорядоченность ламелей, образующих мембрану и включающих 15-30 оксиграфеновых слоев; отдельные слои на СЭМ не видны.

В настоящем докладе будут представлены два новых метода, позволяющих количественно характеризовать внутреннюю структуру МОГ. Метод спинового зонда заключается в сорбции на внутреннюю поверхность мембраны стабильного парамагнитного вещества и определении его ориентационной упорядоченности с помощью спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Ориентация молекул зондов отражает ориентацию оксиграфеновых слоев в мембране. Анализ микрофотографий СЭМ, основанный на технологии машинного обучения, позволяет количественно определять ориентационную упорядоченность ламелей, составляющих мембрану. Сравнение ориентационных параметров порядка мембраны, полученных с помощью ЭПР и СЭМ, позволяет судить об изогнутости оксиграфеновых слоев. Таким образом, совместное использование метода спинового зонда и численного анализа микрофотографий СЭМ, дает возможность детального количественного анализа внутренней структуры МОГ. Разработанные подходы могут быть использованы для изучения мембран произвольной толщины.

Работа поддержана РФФИ (грант 23-23-00016).

### **Ссылки**

1. Nair, R. R., et al. // *Science*, 2012, Vol. 335, pp. 442-444.
2. Tsou, C.-H., et al. // *J. Memb. Sci.*, 2015, Vol. 477, pp. 93-100.
3. Akbari, A., et al. // *Nat. Commun.*, 2016, Vol. 7 no. 10891.
4. H. Huang et al. // *Nat. Commun.*, Vol. 4, pp. 1-9.