

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ НАНОПОР**

**Шестун П. А. (ИТМО), Силюк А. К. (ИТМО), Карпушкина И. А. (ИТМО),**

**Научный руководитель – Гвоздев В. М. (ИТМО)**

**Введение.** Нанопоры – наноразмерные отверстия в мембранах – представляют большой интерес для создания биосенсорных систем и секвенирования ДНК, поскольку позволяют обнаруживать отдельные молекулы [1,2,4]. Существуют два основных типа нанопор: биологические и твердотельные. Цель данного исследования – сравнительный анализ характеристик этих двух подходов на основе обзора опубликованных данных.

**Основная часть.** Биологические нанопоры (например,  $\alpha$ -гемолизин иMspA) характеризуются высокой атомной точностью, стабильностью в широком диапазоне pH, возможностью функционализации и оптимальными размерами пор для транслокации молекул [1]. Однако их применение ограничено фиксированными параметрами формы и размера, механической хрупкостью и чувствительностью к внешним условиям [1]. Твердотельные нанопоры, изготовленные из синтетических материалов, обеспечивают высокую механическую прочность, химическую стойкость и возможность точной настройки геометрии пор с помощью различных методов, таких как FIB, FEB, диэлектрической пробой и химическое травление [1]. Обзор существующих методов изготовления показывает разнообразие подходов в данной области. Ключевым параметром работы нанопорных сенсоров является соотношение сигнал/шум (SNR). Твердотельные SiNx нанопоры демонстрируют высокий SNR благодаря возможности работы при повышенных напряжениях и частотах [2]. С другой стороны, биологические нанопоры, особенно в сочетании с технологиями замедления транслокации, способны достигать ещё более высокого SNR [2]. Низкочастотный шум в биологических нанопорах зачастую обусловлен протонированием ионизируемых групп внутри белкового канала, тогда как природа такого шума в твердотельных нанопорах остаётся менее изученной. Для снижения  $1/f$  шума в твердотельных нанопорах применяют функционализацию поверхности гидрофильными материалами (например, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или SiO<sub>2</sub>) [2].

**Выводы.** Анализ показал, что биологические и твердотельные нанопоры представляют собой взаимодополняющие подходы к созданию нанопорных сенсоров. Твердотельные нанопоры обеспечивают высокую механическую и химическую стабильность, а также высокий SNR при широком диапазоне рабочих условий. Биологические нанопоры, благодаря структурной однородности и возможностям функционализации, демонстрируют потенциал для высокоразрешающего секвенирования ДНК. Дальнейшие исследования, направленные на снижение шума, оптимизацию контроля транслокации и совершенствование методов функционализации, будут способствовать расширению практических применений обоих типов нанопор.

**Список использованных источников:**

1. Chen, Q., & Liu, Z. (2019). Fabrication and Applications of Solid-State Nanopores. *Sensors*, 19(8), 1886.
2. Fragasso, A., Schmid, S., & Dekker, C. (2020). Comparing Current Noise in Biological and Solid-State Nanopores. *ACS Nano*, 14(2), 1338-1349.
3. Lepoitevin, M., Ma, T., Bechelany, M., Janot, J.-M., & Balme, S. (2017). Functionalization of single solid state nanopores to mimic biological ion channels: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 250, 195-213.

4. Mohammadi, M. M., & Bavi, O. (2022). DNA sequencing: an overview of solid-state and biological nanopore-based methods. *Biophysical Reviews*, 14(1), 99-110.