

## УСИЛЕНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НАНОЗИМОВ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Комник В. В.<sup>1</sup>, Лящук В. К.<sup>1</sup>, Кладько Д. В.<sup>1</sup>

Научный руководитель – канд. хим. наук, доцент Кладько Д. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

komnik@pish.itmo.ru

### Введение

Нанозимы — это наноматериалы с ферментоподобной активностью, обладающие высокой стабильностью, воспроизводимостью и устойчивостью к внешним воздействиям по сравнению с природными ферментами [1–3]. Особый интерес представляют магнитные наночастицы, сочетающие каталитические свойства с возможностью дистанционного управления при помощи внешнего магнитного поля [4, 5]. Несмотря на то, что влияние высокочастотных магнитных полей на нанозимную активность в основном связывают с эффектами магнитной гипертермии [6], потенциал низкочастотных переменных магнитных полей (ПМП) в реализации нетепловых механизмов регуляции каталитической активности остается недостаточно изученным [7]. В связи с этим актуальной задачей является исследование влияния низкочастотного ПМП на пероксидазоподобную активность магнитных нанозимов.

### Основная часть

Наночастицы  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  были синтезированы одностадийным гидротермальным методом при 200 °С с формированием кристаллической шпинельной структуры [4]. По данным сканирующей электронной микроскопии средний диаметр частиц составил  $85 \pm 22$  нм. Рентгенофазовый анализ подтвердил высокую кристалличность и фазовую чистоту образца без примесей вторичных фаз. Пероксидазоподобную активность оценивали в реакции окисления 3,3',5,5'-тетраметилбензидина (ТМБ) в присутствии  $\text{H}_2\text{O}_2$  при рН 4,0 и 30 °С. Образование окрашенного продукта фиксировали спектрофотометрически при 652 нм [8]. Кинетический анализ показал соответствие реакции модели Михаэлиса–Ментен с параметрами:  $K_m = 3,2$  мМ и  $V_{\max} = 6,6 \times 10^{-8}$  М·с<sup>-1</sup> [1, 2]. Линейная зависимость начальной скорости от концентрации наночастиц свидетельствует об отсутствии агрегации и независимости активных центров. Влияние переменного магнитного поля исследовали при частотах 0–200 Гц и амплитуде 1–12,5 мТ. При воздействии ПМП (200 Гц, 10 мТ) наблюдалось двукратное увеличение максимальной скорости реакции ( $V_{\max} = 1,2 \times 10^{-7}$  М·с<sup>-1</sup>) при незначительном изменении  $K_m$  (4,2 мМ), что указывает на усиление каталитического оборота без существенного изменения сродства к субстрату [5, 6]. Частотный анализ выявил максимум активности при 50 Гц ( $4,04 \pm 0,33 \times 10^{-8}$  М·с<sup>-1</sup>) и выраженную зависимость эффекта от амплитуды поля с оптимумом при 12,5 мТ [7]. Эксперименты с ловушками активных форм кислорода показали, что доминирующим механизмом реакции является межфазный перенос электрона [7], а усиление активности в ПМП не изменяет основной путь катализа.

### Выводы

Показано, что низкочастотное переменное магнитное поле способно эффективно и управляемо усиливать пероксидазоподобную активность нанозима  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  преимущественно за счет нетепловых механизмов [7]. Двукратное увеличение  $V_{\max}$  при оптимальных параметрах ПМП (50 Гц, 7,5–12,5 мТ) подтверждает возможность

дистанционного регулирования каталитических процессов без изменения их фундаментального механизма. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования низкочастотных магнитных полей как биосовместимого инструмента пространственно-временного контроля активности нанозимов для задач биосенсорики и медицинских приложений [3].

### Литература

1. Nanozymology / ed. X. Yan. — Singapore : Springer, 2020. — DOI: 10.1007/978-981-15-1490-6.
2. Gao L., Wei H., Dong S., Yan X. Nanozymes // *Advanced Materials*. — 2024. — Vol. 36, № 10. — DOI: 10.1002/adma.202305249.
3. Ashrafi A. M., Bytesnikova Z., Barek J., Richtera L., Adam V. A critical comparison of natural enzymes and nanozymes in biosensing and bioassays // *Biosensors and Bioelectronics*. — 2021. — Vol. 192. — 113494. — DOI: 10.1016/j.bios.2021.113494.
4. Ghazzy A., Nsairat H., Said R. et al. Magnetic iron oxide-based nanozymes: from synthesis to application // *Nanoscale Advances*. — 2024. — Vol. 6, № 6. — P. 1611–1642. — DOI: 10.1039/D3NA00903C.
5. Zhang Y., Wang Y., Zhou Q. et al. Precise regulation of enzyme–nanozyme cascade reaction kinetics by magnetic actuation // *ACS Applied Materials & Interfaces*. — 2021. — Vol. 13, № 44. — P. 52395–52405. — DOI: 10.1021/acsami.1c15717.
6. He Y., Chen X., Zhang Y. et al. Magneto-responsive nanozyme: magnetic stimulation on the nanozyme activity of iron oxide nanoparticles // *Science China Life Sciences*. — 2022. — Vol. 65, № 1. — P. 184–192. — DOI: 10.1007/s11427-020-1907-6.
7. Xu H., Wang M., Yu Z.-G., Wang K., Hu B. Magnetic field effects on excited states, charge transport, and electrical polarization in organic semiconductors // *Advances in Physics*. — 2019. — Vol. 68, № 2. — P. 49–121. — DOI: 10.1080/00018732.2019.1590295.
8. Jiang B., Duan D., Gao L. et al. Standardized assays for determining the catalytic activity and kinetics of peroxidase-like nanozymes // *Nature Protocols*. — 2018. — Vol. 13, № 7. — P. 1506–1520. — DOI: 10.1038/s41596-018-0001-1.