

**Цинковый сайт связывания зеркальных родопсинов: эволюционная закономерность, подкреплённая геномным контекстом****Научный руководитель – Бухалович Сергей Михайлович***Сидоров Д.В.<sup>1</sup>, Бухалович С.М.<sup>2</sup>, Рижиков Ю.Л.<sup>3</sup>*1 - Московский физико-технический институт, Москва, Россия, *E-mail: sidorov.dv@phystech.edu*;2 - Московский физико-технический институт, Москва, Россия, *E-mail: serg.b1998@mail.ru*; 3 -Московский физико-технический институт, Москва, Россия, *E-mail: rizhikov@phystech.edu*

Зеркальные родопсины (MR) относятся к группе микробных родопсинов – фоточувствительных мембранных белков, представители которых способны к светозависимому транспорту протонов. При этом MR имеют характерную pH-чувствительность, усиливая мощность прокачки в кислых условиях [1]. Ранее было показано, что среди MR есть как цинк зависимые, так и независимые представители. Считается, что сайт связывания с цинком (ZBS) образован по крайней мере двумя гистидинами [1]. Гистидин на 37 позиции по аминокислотной последовательности белка *SpaR* (из *Sphingomonas paucimobilis*) консервативен в обеих группах. Но для формирования ZBS необходим гистидин на 33-ей позиции, именно он и определяет чувствительность к цинку. Интересно отметить, что константа диссоциации ( $K_d$ ) лежит в миллимолярном диапазоне, что является критично опасным условием для клеток, а также эта  $K_d$  на порядки больше относительно других описанных белков, связывающих цинк [2]. Остаётся не ясным: является ли данная особенность эволюционной закономерностью или случайным фактором.

Нами был проведен сравнительный анализ геномного окружения MR, содержащих оба гистидина в ZBS. В результате были обнаружены консервативные геномные шаблоны. Один из наиболее характерных – подряд идущие регулятор ответа (RR), гистидинкиназа, MR и  $\beta$ -каротин 15,15'-диоксигеназа. При этом, RR, в подавляющем числе найденных случаев, имеют описание в аннотациях: регуляторы ответа на тяжёлые металлы. RR из различных представленных организмов демонстрируют высокую гомологичность, а предположительный сайт связывания исследуемых RR с ДНК характерно часто встречается в гене MR. Также были обнаружены и другие характерные шаблоны генов, расположенных в непосредственной близости от MR. Например, близость генов белков, транспортирующих органические кислоты, которые способствуют хелатированию двухвалентных катионов (цинка в первую очередь), а также транспортеров двухвалентных металлов.

Совокупность данных фактов выступает сильным аргументом в пользу гипотезы о значимой биологической роли цинк-связывающего сайта в MR. Дополнительным доводом является то, что большая часть генов данных MR были выделены из организмов, найденных в условиях высокой концентрации ионов тяжёлых металлов, что делает данный контекст для части носителей MR правдоподобным экологическим сценарием [3].

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (номер темы FSMG-2025-0003, соглашение 075-03-2026-305).

**Источники и литература**

- 1) Okhrimenko I. S. et al. Mirror proteorhodopsins //Communications chemistry. – 2023. – Т. 6. – №. 1. – С. 88.
- 2) Kambe T. et al. The physiological, biochemical, and molecular roles of zinc transporters in zinc homeostasis and metabolism //Physiological reviews. – 2015.
- 3) Tangaromsuk J. et al. Cadmium biosorption by *Sphingomonas paucimobilis* biomass //Bioresource technology. – 2002. – Т. 85. – №. 1. – С. 103-105.