

Нейтронно-захватная терапия — от малых молекул к мультимодальным наноплатформам

Козырев С.В.¹, Вуль А.Я.², Дидейкин А.Т.², Лебедев В.Т.³

svkozyrev@list.ru

¹ СПбСУ, г. Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

³ ПИЯФ им. Б.П. Константинова НИЦ КИ, г. Гатчина, Ленинградская область, Россия

Современная онкология характеризуется смещением фокуса в сторону биологических методов (CAR-T, моноклональные антитела), однако их эффективность часто ограничена гетерогенностью опухолей и барьерными структурами организма. Физические методы терапии и диагностики выступают в этой ситуации как необходимый технологический мост, давая инструмент воздействия «здесь и сейчас» [1]. Среди них особое место занимает нейтрон-захватная терапия (НЗТ), дополняющая биологические подходы физическим прецизионным разрушением мишеней на клеточном уровне [2]. НЗТ занимает уникальную клиническую нишу, позволяя решать задачи, недоступные классической радиотерапии, благодаря селективности воздействия при минимальном повреждении здоровых тканей. Однако проектирование систем доставки для НЗТ требует иного подхода, чем в химиотерапии: если там обеспечивается непрерывная зависимость «доза-ответ», то в НЗТ необходимо обеспечить достижение в каждой клетке порогового числа атомов бора ^{10}B или другого нейтрон-захватного нуклида [3]. Невыполнение этого условия ведет к выживанию недооблученных клонов и рецидиву, что делает «гарантию минимума» приоритетнее «улучшения среднего» [4].

В работе обоснован и реализован трансляционный и системный подход к дизайну мультимодальных наноалмазных платформ для нейтрон-захватной терапии. Подход обеспечивает оптимизированные параметры внутриклеточного накопления, контролируемую кинетику удержания в опухолевой мишени и интеграцию средств навигации (МРТ/ПЭТ) для верификации накопления перед облучением.

Предложена архитектура многослойной наноплатформы на основе наноалмазов с использованием полиглицерина (PG) [6] в качестве универсального «химического хаба» для присоединения терапевтических и диагностических модулей.

Выявлена, ранее не описанная в литературе, возможность усиления поражения опухолевых клеток при объёмном легировании наноалмазной матрицы изотопом бор-10. Этот механизм обусловлен локальными термомеханическими эффектами, возникающими при ядерной реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ вследствие уникальных физико-механических свойств алмаза (высокая жёсткость, теплопроводность и стабильность).

Ссылки

1. S. V. Kozyrev and P. P. Yakutseni, *Nedelya nauki v SPbPU* (2014) 1, 275.
2. D. Zheng, G. Hong, O. T. D. M. Le, A. Podgorsak, M. Webster, F. Li, Y. Zhou, H. Jung, and J. Yoon, *Cancers* (2026) 18, 498.
3. W. A. G. Sauerwein, A. Wittig, R. L. Moss, Y. Nakagawa, and K. Ono, *Neutron Capture Therapy* (Springer, Berlin, 2025).
4. S. Kawabata, S. Miyatake, T. Kuroiwa, and M. Suzuki, *Cancer Commun.* (2018) 38, 35.
5. V. T. Lebedev, G. Török, Y. V. Kulvelis, O. I. Bolshkova, N. P. Yevlampieva, M. A. Soroka, E. V. Fomin, A. Ya. Vuld, and S. Garg, *Soft Mater.* (2021) 19, 1.
6. M. Nishikawa, M. Liu, T. Yoshikawa, H. Takeuchi, N. Matsuno, and N. Komatsu, *Carbon* (2024) 221, 118905.