

Моделирование радиационного повреждения опухолевых клеток при использовании бор-нитридных квантовых точек в бор-нейтронной терапии

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²НИИ Ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

³Центр физических наук и технологий, Вильнюс, Литва

Бор-нейтронная терапия (БНТ) – это перспективный нехирургический радиотерапевтический метод лечения инвазивных злокачественных опухолей (первичные опухоли головного мозга, рецидивирующий рак головы и шеи, кожные и внекожные меланомы), который включает в себя две стадии.

1) Пациенту вводят лекарство, определяющее локализацию опухоли, содержащее нерадиоактивный изотоп бор-10 (^{10}B), который имеет высокую склонность к захвату тепловых нейтронов. Поперечное сечение захвата тепловых нейтронов у изотопа ^{10}B (3837 барн) во много раз больше, чем у других элементов, присутствующих в тканях.

2) Пациента облучают надтепловыми нейтронами. После потери части энергии при проникновении в ткань нейтроны захватываются ^{10}B с образованием ^{11}B в возбужденном состоянии, который за пикосекунды распадается на высоко-энергетичные альфа-частицы (^4He), ядра ^7Li и гамма-квант (94% случаев). Ввиду ограниченного диапазона действия (<10 мкм) [1] эти заряженные частицы вызывают радиационно-индуцированные повреждения только в тех клетках, которые поглотили и накопили достаточное количество ^{10}B [2].

Эффективность БНТ зависит, главным образом, от концентрации бора (должно быть избирательно доставлено примерно 10^9 атомов ^{10}B на клетку [1],) и его избирательного накопления и распределения именно в опухолевых клетках-мишенях.

В качестве эффективных «носителей» изотопа ^{10}B в настоящее время рассматривают различные бор-нитридные наноматериалы. К ним от-

носятся бор-нитридные нанотрубки [2], наноструктурированный нитрид бора [3], бор-нитридные наночастицы и др. Ведутся постоянные разработки новых борсодержащих высоко специфичных для опухолевых клеток препаратов для БНТ, исследуются механизмы накопления данных соединений в трансформированных клетках.

Цель настоящего исследования: провести теоретическую оценку эффективности нейтронной терапии при использовании бор-нитридных квантовых точек (БНКТ), учесть вариабельность степени обогащения БНКТ изотопом ^{10}B , локальной концентрации БНКТ, микроокружения БНКТ, а также типа опухолевых клеток.

Процесс взаимодействия ионов с веществом клетки моделировали методом Монте-Карло, реализованном в программном пакете «Stopping and Range of Ion in Matter» (SRIM) [4].

В работе были построены несколько моделей опухолевых клеток, различающихся между собой по нуклеоплазматическому соотношению (клетки лимфомы, меланомы, плоскоклеточной карциномы), а также проведено исследование зависимости радиационного повреждения клеток от характера распределения и локализации БНКТ (в межклеточном пространстве, в мембране, цитоплазме или ядре). В этом исследовании мы рассмотрели ионизирующую энергию, выделяемую ионами ^4He и ^7Li в различных областях опухолевой клетки, при этом учли, что возможны два типа реакции распада ^{11}B , образуемого при поглощении тепловых нейтронов бором-10 ($^4\text{He}^{2+}(1,47 \text{ МэВ})/^7\text{Li}^{3+}(0,84 \text{ МэВ})$ и $^4\text{He}^{2+}(1,78 \text{ МэВ})/^7\text{Li}^{3+}(1,01 \text{ МэВ})$). В результате моделирования определена оптимальная локализация БНКТ в опухолевых клетках в зависимости от типа опухоли, позволяющая реализовать максимальное повреждение опухолевых клеток при БНТ.

Литература

1. Coderre J.A., Morris G.M. The radiation biology of boron neutron capture therapy // Radiation Research. 1999. Vol. 151, № 1. P. 1–18.
2. Ferreira T.H., de Sousa E.M.B. Applications and perspectives of boron nitride nanotubes in cancer therapy // Boron Nitride Nanotubes in Nanomedicine. Elsevier Inc., 2016. P. 95–109.
3. Singh B. et al. Nanostructured Boron Nitride with High Water Dispersibility for Boron Neutron Capture Therapy // Sci. Rep. 2016. Vol. 6.
4. Ziegler J. James Ziegler - SRIM & TRIM. 2017.