

УДК 539.172.12; 539.1.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВЫХ БРЭГГА ДЛЯ ПРОТОНОВ, АЛЬФА-ЧАСТИЦ И ИОНОВ УГЛЕРОДА В ВОДЕ

А. В. Багуля¹, В. М. Гришин¹, В. А. Рябов¹, И. Н. Завестовская^{1,2}

Кривые Брэгга для протонов, альфа-частиц и ионов углерода в воде рассчитывались с помощью программного пакета GEANT4. Результаты расчетов, представляющие интерес для практического применения в протонной и ионной терапии, сравнивались с экспериментальными данными в терминах приведенных значений χ^2 . Наилучший результат был получен в рамках набора физических моделей QBBC-opt_0, который не оптимизирован для медицинских приложений. Сделан вывод, что для улучшения точности планирования облучения пациента необходимо развитие альтернативных моделей ионизации медленных частиц в биоматериалах. Предлагается конкретная модель, развитие которой поможет решению этой задачи.

Ключевые слова: протонная терапия, кривая Брэгга, протон, альфа-частица, ион углерода, вода.

Введение. В ФИАН разработан протонный синхротрон для применения его в технологиях протонной лучевой терапии социально значимых заболеваний, в том числе онкологии [1, 2]. В мировой практике для лучевой терапии кроме протонных пучков используются пучки альфа-частиц и ионов углерода. Пучки альфа-частиц и ионов углерода позволяют сузить область пика Брэгга по сравнению с протонами, локализуя область облучения пациента. Вода является основным материалом тела человека, поэтому расчеты кривых Брэгга — продольного профиля потерь энергии — для воды представляют интерес для практического дозиметрического планирования облучения пациентов.

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: bagulyaav@lebedev.ru.

² НИЦ “Курчатовский Институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

В данной работе проведены расчеты кривых Брэгга для протонов, альфа-частиц и ионов углерода в воде в области начальных кинетических энергий порядка 100–200 МэВ/нуклон. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными в терминах приведенных значений χ^2 .

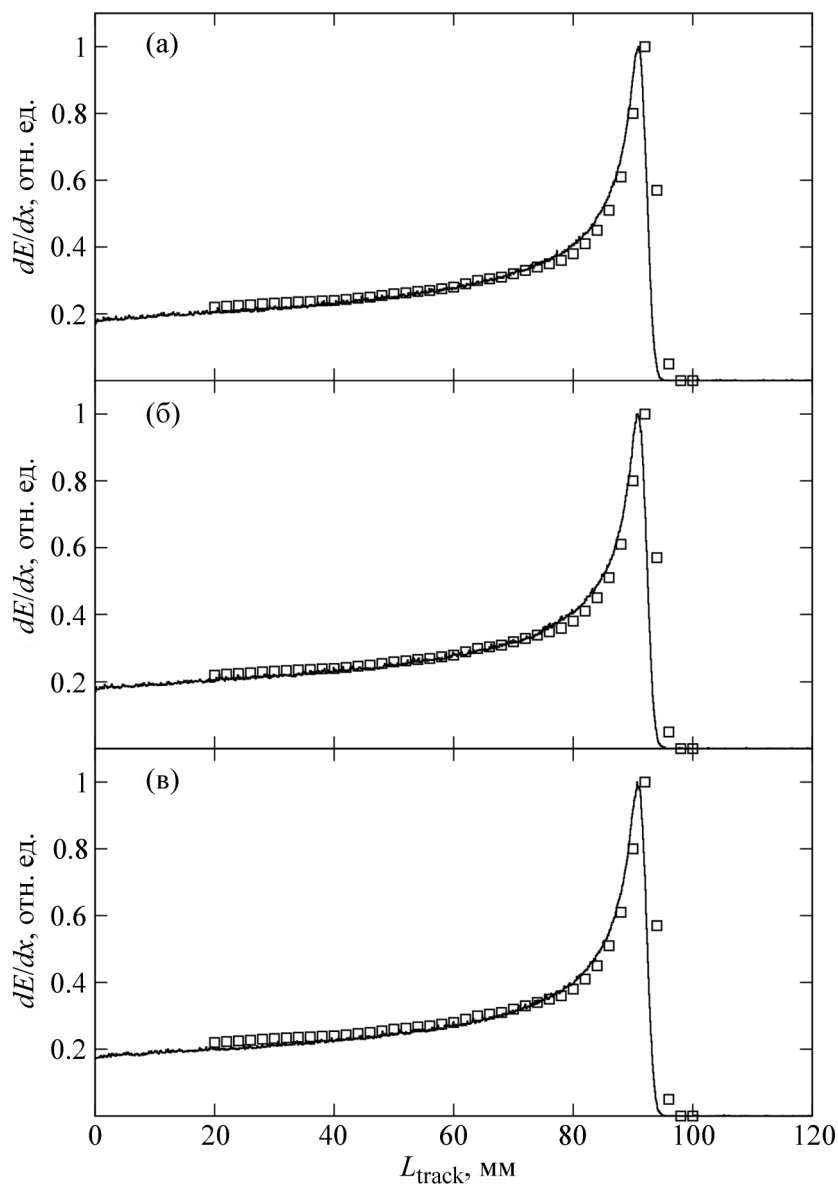


Рис. 1: Кривая Брэгга в воде для протонов с энергией 110 МэВ. Сплошные кривые: (а) *QBVC-opt_0*, (б) *QBVC-opt_3*, (в) *QBVC-opt_4*. Точки – экспериментальные данные [10, 11].

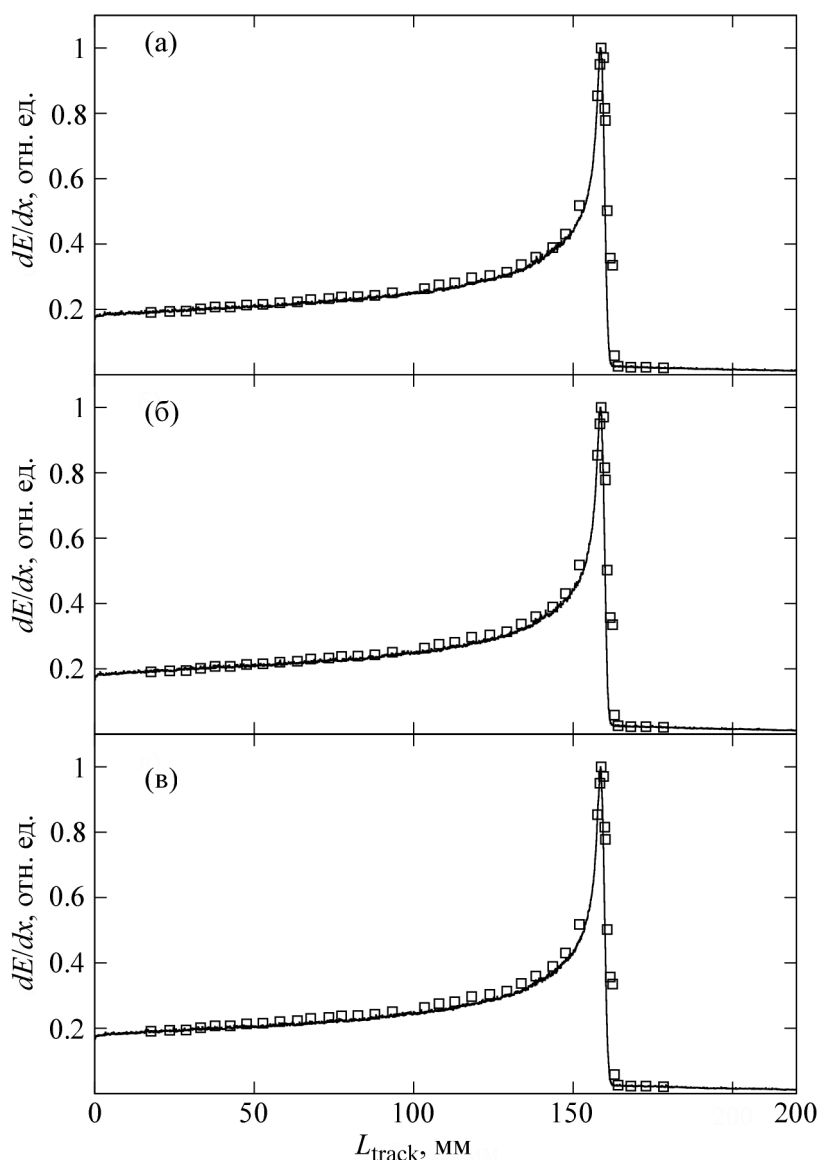


Рис. 2: Кривая Брэгга в воде для альфа-частиц с энергией 150 МэВ/нуклон. Сплошные кривые: (а) QBVC-opt_0, (б) QBVC-opt_3, (в) QBVC-opt_4. Точки – экспериментальные данные [12].

Моделирование кривых Брэгга в воде. Расчеты кривых Брэгга проводились в рамках программного пакета GEANT4 [3–5], версия 11.2 от декабря 2023 г. При выполнении моделирования в качестве мишени использовался водяной цилиндрический фантом длиной 300 мм, разделенный на тонкие слои перпендикулярно к направлению пучка. Для увеличения точности моделирования продольного профиля энерговыведения количе-

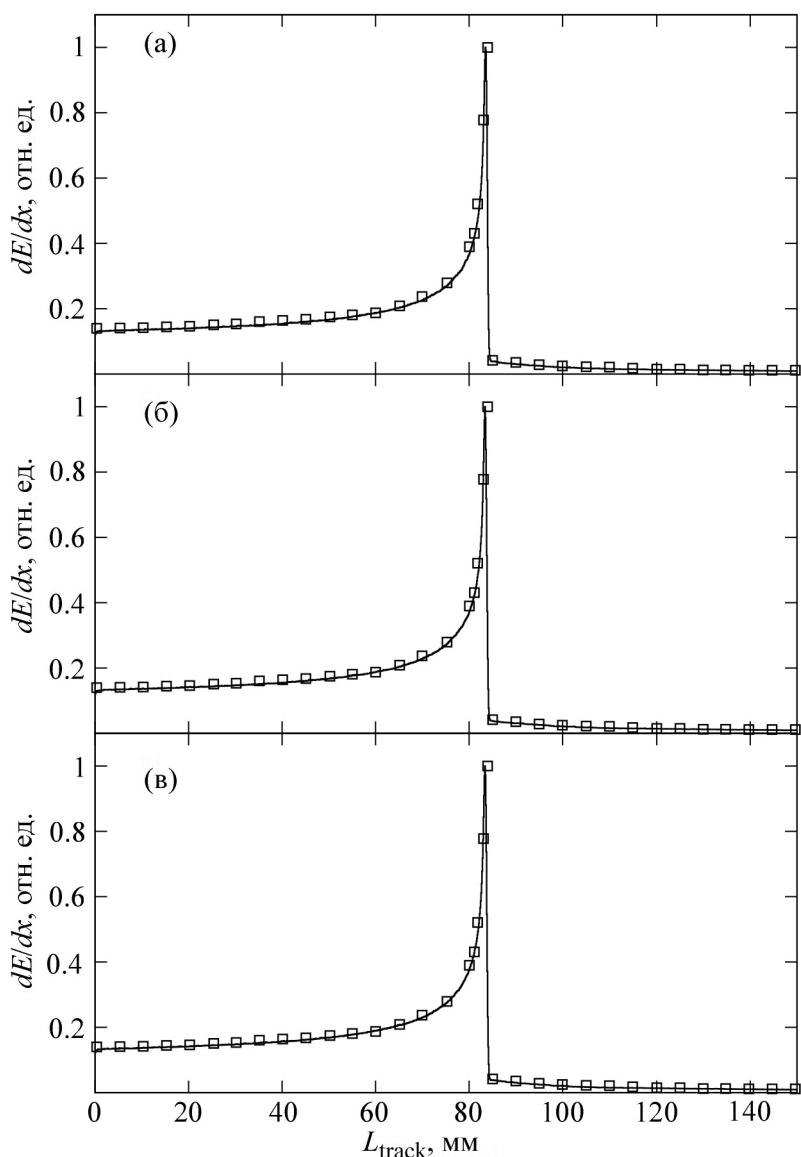


Рис. 3: Кривая Брэгга в воде для ионов углерода с энергией 195 МэВ/нуклон. Сплошные кривые: (а) QBVC-opt_0, (б) QBVC-opt_3, (в) QBVC-opt_4. Точки – экспериментальные данные [10, 13].

ство слоёв выбиралось равным 3000. Потери энергии усреднялись в каждом слое. Использовался набор физических процессов QBVC, который показал удовлетворительное согласие расчетов с данными для протонов [6]. Электромагнитная физика описывалась стандартным конструктором (opt_0) и конструкторами (opt_3, opt_4), используемым в проекте GEANT4-DNA [7] (opt_4) и в медицинских приложениях GEANT4 (opt_3).

Их различие в основном относится к описанию ионизации и многократного рассеяния электронов.

Основной вклад в потери энергии медленных заряженных частиц дают ионизационные потери. В стандартном конструкторе `opt_0` для описания ионизации материала, доступном в базе данных Национального института по стандартам и технологиям США (NIST, National Institute of Standards and Technology) (в нашем случае – `G4_WATER`) используется параметризация средних ионизационных потерь для протонов или ионов (альфа-частицы, ионы углерода), если кинетическая энергия меньше 10 МэВ [8]. Выше этой величины используется формула Бете–Блоха [9].

На рис. 1–3 показаны кривые Брэгга для протонов, альфа-частиц и ионов углерода с энергиями 110 МэВ, 150/нуклон МэВ и 195 МэВ/нуклон, соответственно. Сплошные кривые на верхней части графиков отвечают набору физических моделей `QBVC-opt_0`, в середине – `QBVC-opt_3`, в нижней части – `QBVC-opt_4`. Экспериментальные точки для протонов [10, 11], для альфа-частиц [12] и для ионов углерода [10, 13]. Все распределения нормированы на максимум.

Таблицы 1–3 показывают значения приведенного χ^2 : χ^2/N_{df} , где N_{df} – число степеней свободы (число экспериментальных точек в пределах обрабатываемого интервала глубины трека в воде). Интервал глубины трека протонов (70–96 мм), альфа-частиц (133–163 мм) и ионов углерода (60–85 мм) отвечал пику Брэгга, поскольку эта область обычно приходится на облучаемую опухоль.

Т а б л и ц а 1

Приведенные χ^2 для кривых Брэгга (`QBVC-opt_0`)

пучок	χ^2	N_{nd}	χ^2/N_{df}
протоны	2172.1	13	167.1
альфа-частицы	2517.7	13	193.7
ионы углерода	34.6	8	4.3

Т а б л и ц а 2

Приведенные χ^2 для кривых Брэгга (`QBVC-opt_3`)

пучок	χ^2	N_{nd}	χ^2/N_{df}
протоны	2190.4	13	168.5
альфа-частицы	2894.2	13	222.6
ионы углерода	397.5	8	49.7

Т а б л и ц а 3

Приведенные χ^2 для кривых Брэгга (QBVC-opt_4)

пучок	χ^2	N_{nd}	χ^2/N_{df}
протоны	2168.9	13	166.8
альфа-частицы	2954.0	13	227.2
ионы углерода	397.6	8	49.7

Обсуждение. Расчеты кривых Брэгга для протонов, альфа-частиц и ионов углерода в воде в терминах приведенного χ^2 показывают, что точность описания экспериментальных данных для альфа-частиц на уровне точности протонов, тогда как для ионов углерода точность выше точности для протонов и альфа-частиц. Это означает, что для описания геометрической модели исследуемых объектов предпочтительно использовать материалы из базы данных NIST (альфа-частицы, ионы углерода) при применении программного пакета Geant4 для планирования доз в сеансах облучения онкологических заболеваний. Использование таких материалов, как G4_BLOOD_ICRP для крови человека, G4_BONE_COMPACT_ICRU для костей, G4_BRAIN_ICRP для мозга, G4_LUNG_ICRP для легких, G4_MUSCLE_SKELETAL_ICRP для мышц и т. п., для описания геометрии при планировании сеансов облучения пациента означает применение NIST-параметризаций ионизационных потерь энергии ионов. Это потенциально обеспечивает более высокую точность описания кривых Брэгга альфа-частиц в биологических материалах, как показано в этой работе для воды. Однако с точки зрения статистического описания в терминах приведенного χ^2 ни одно из моделирований не обеспечило это значение порядка единицы. Наилучший результат 4.3 для ионов углерода в рамках набора физических моделей QBVC-opt_0 (стандартного конструктора, не оптимизированного для медицинских приложений) означает, что для улучшения точности планирования облучения пациента необходимо развитие альтернативных моделей ионизации медленных частиц в биоматериалах. Например, расширение в область молекулярных возбуждений интервала применимости модели фотоионизации МФИ (photo-absorption ionisation (PAI) model) [14], которая является универсальной, позволяет описывать ионизационные процессы в широких диапазонах энергии частиц и толщин материалов, причем состав материалов практически не ограничен. В этом состоит основной вывод данной работы.

Авторы благодарны В. Н. Иванченко за полезные обсуждения особенностей наборов физических моделей QBVC-opt_0–QBVC-opt_4 и неожиданного результата сравнительно высокой точности набора QBVC-opt_0.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2021-1347.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. Н. Завестовская, А. В. Колобов, В. А. Рябов, УФН, принята к публикации. DOI: 10.3367/UFNr.2024.04.039676.
- [2] А. А. Пряничников, В. В. Сокунов, А. Е. Шемяков, Письма в ЭЧАЯ **15**(7), 993 (2018). DOI: 10.1134/S1547477118070592.
- [3] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **506**, 250 (2003). DOI:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
- [4] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **53**(1), 270 (2006). DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
- [5] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **835**, 186 (2016). DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
- [6] А. В. Багуля, М. С. Владимиров, В. Н. Иванченко, Н. И. Старков, Краткие сообщения по физике ФИАН **36**(5), 3 (2009). DOI: 10.3103/S1068335609050017.
- [7] S. Incerti, G. Baldacchino, M. Bernal, et al., Int. J. Model. Simul. Sci. Comput. **1**, 157 (2010). DOI: 10.1142/S1793962310000122.
- [8] <https://physics.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl>.
- [9] <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/index.html>.
- [10] I. Gudowska, N. Sobolevsky, P. Andreo, et al., Phys. Med. Biol. **49**, 1933 (2004). DOI: 10.1088/0031-9155/49/10/008.
- [11] U. Oelfke, G. K. Y. Lam, M. S. Atkins, Phys. Med. Biol. **41**, 177 (1996). DOI: 10.1088/0031-9155/41/1/013.
- [12] J. T. Lyman, J. Howard, Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. **3**, 81 (1977). DOI: 10.1016/0360-3016(77)90231-0.
- [13] M. Krämer, O. Jäkel, T. Haberer, et al., Phys. Med. Biol. **45**, 3299 (2000). DOI: 10.1088/0031-9155/45/11/313.
- [14] J. Apostolakis, S. Giani, L. Urban, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **453**, 597 (2000). DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00457-5.

Поступила в редакцию 24 июня 2024 г.

После доработки 6 июля 2024 г.

Принята к публикации 6 июля 2024 г.