

14

## Метод дозиметрического планирования послеоперационной протонной терапии рака молочной железы с учетом влияния металлического клапана экспандера

© А.М. Демидова, Ю.Д. Удалов, С.В. Иванов, С.Е. Гриценко, В.А. Киселев

Федеральный научно-клинический центр медицинской радиологии и онкологии  
Федерального медико-биологического агентства, Димитровград, Ульяновская обл., Россия  
E-mail: demidovaam@fvcmrmba.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2024 г.

В окончательной редакции 3 июля 2024 г.

Принято к публикации 12 июля 2024 г.

Исследовано влияние металлического клапана экспандера молочной железы на дозовое распределение послеоперационной протонной терапии рака молочной железы. С помощью запатентованного фантома с анатомической формой молочной железы установлено, что проявляется „провал дозы“ в области грудной клетки. Разработан метод дозиметрического планирования послеоперационной протонной терапии рака молочной железы с учетом влияния металлического клапана экспандера на основе корректных контуров облучаемой области, устраняющий эффект „провала дозы“.

**Ключевые слова:** протонная терапия, дозиметрическое планирование, рак молочной железы, экспандер, лучевая терапия.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58959.20006

Доставка терапевтических доз в протонной терапии требует точной оценки водэквивалентной толщины материалов на пути терапевтического пучка [1]. Наличие экспандера в молочной железе, содержащего элементы с высоким атомным номером, в частности металлического клапана, может внести неопределенность в водэквивалентную толщину [2]. Причиной этого служат, как правило, возникающие артефакты от металлических компонентов экспандера [3], искажающие реальный вид металлического клапана и плотности окружающих тканей [4]. Таким образом, целью данного исследования является разработка метода дозиметрического планирования послеоперационной лучевой терапии рака молочной железы на основе корректных контуров облучаемой области.

Исследование проводилось с помощью запатентованного разработанного дозиметрического фантома анатомической формы молочной железы [5], строение которого представлено на рис. 1.

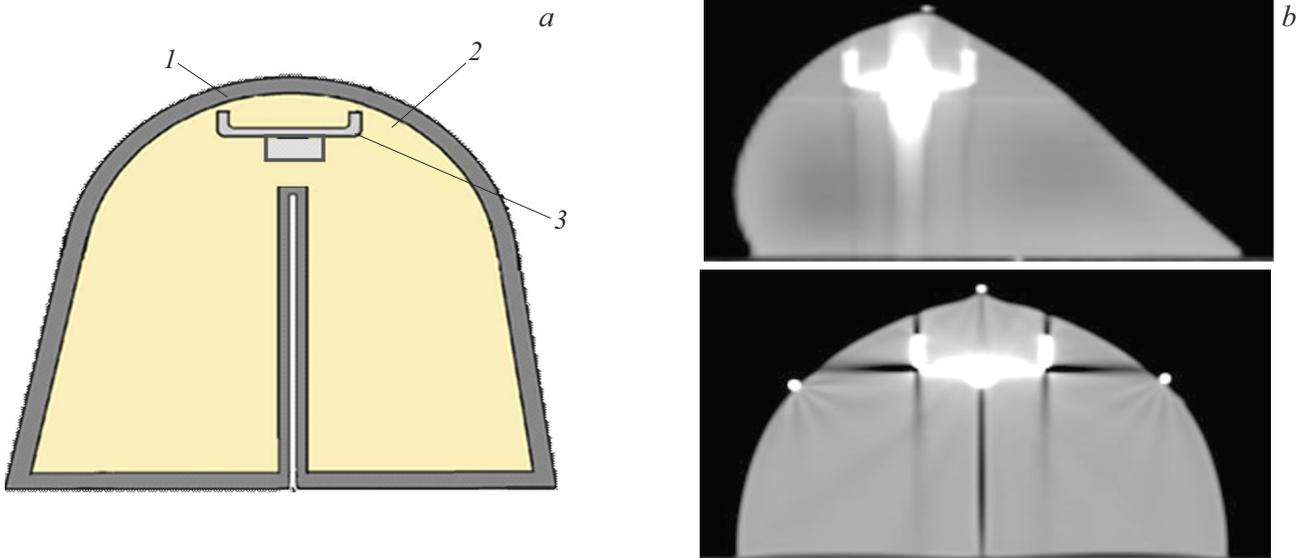
Поверхность дозиметрического фантома выполнена посредством фотополимерной 3D-печати на принтере Mars 3 Pro (Elegoo, Китай), внутри компоненты из эпоксидных смол, имитирующие плотность водной среды. В область эквивалентной водной среды помещен клапан из нержавеющей стали экспандера молочной железы Mentor (Johnson & Johnson, США), не контактирующий со стенками фантома. Фантом имеет технологическое отверстие — щель для помещения дозиметрической пленки, с помощью которой осуществлялись измерения распределения поглощенной дозы и анализ полученных данных в сагиттальной плоскости, перпендикулярной

задней поверхности клапана экспандера молочной железы.

Дозиметрическое планирование проводилось посредством двух различных алгоритмов. Первый способ подразумевал дозиметрическое планирование без воссоздания контурами истинного вида металлического клапана экспандера и без корректировки плотности области, подверженной артефактам. Во втором случае дозиметрическое планирование проводилось с оконтуриванием истинной формы металлического клапана экспандера и оценкой плотности окружающих структур, подверженных артефактам (рис. 2).

Топометрическое КТ-исследование реализовалось с помощью компьютерного томографа Brilliance Big Bore (Philips, США). Оконтуривание и дозиметрический расчет осуществлялись в системе дозиметрического планирования протонной и фотонной лучевой терапии Pinnacle 16.2 (Philips, США) с применением методики IMPT и алгоритма расчета на основе Pencil Beam с применением энергии протонного пучка от 101 до 177 MeV.

Метод дозиметрического планирования послеоперационной лучевой терапии рака молочной железы с учетом влияния металлического клапана экспандера заключается в восстановлении корректной формы металлического клапана экспандера и оценке плотности окружающих структур. Оконтуривание клапана экспандера согласовывали с его реальным видом (рис. 2), игнорируя артефакты, искажающие его видимую форму, путем изменения окна отображения так, чтобы были видны только границы клапана. Далее получившемуся контуру присваивался коэффициент плотности нержавеющей стали, так как артефакты образовывали ложные воздуш-



**Рис. 1.** Схематическое строение (а) и КТ-исследования (б) дозиметрического фантома с анатомической формой молочной железы. 1 — поверхность фантома, выполненная посредством 3D-печати; 2 — внутренняя часть фантома из эпоксидных смол; 3 — металлический клапан экспандера.

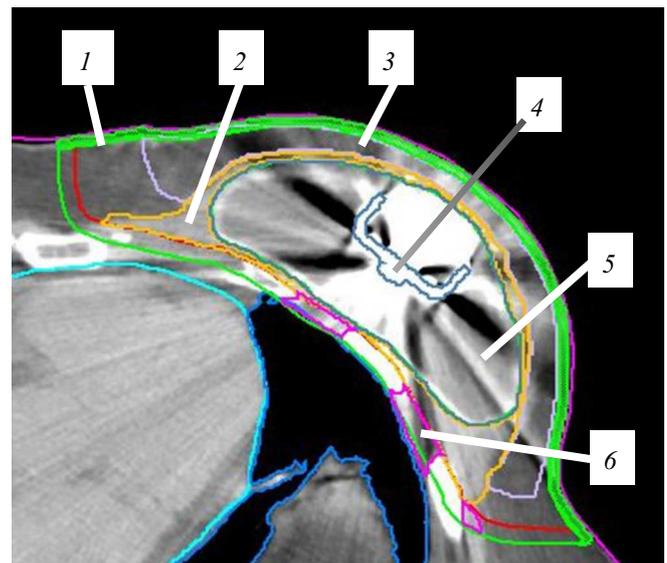
ные полости в контуре клапана при топометрическом КТ-исследовании. Затем оконтуривались окружающие анатомические структуры, которые были подвержены артефактам, с оценкой плотности структур, т. е. в случае оконтуривания фантому присваивалась плотность водной среды, а в случае пациента — плотности мышечной, жировой тканей и водной среды наполненного экспандера (рис. 2).

Необходимо отметить, что расчет тестовых дозиметрических планов двумя описываемыми способами осуществлялся три раза для учета погрешностей доставки пучка и оконтуривания. Большее количество тестовых планов не требуется, так как поверхности и внутренние составляющие фантома не подвергаются геометрическим и плотностным изменениям.

Важными условиями применения метода послеоперационной лучевой терапии рака молочной железы с учетом влияния металлического клапана экспандера являются наличие калибровочной кривой топометрического компьютерного томографа в системе дозиметрического планирования с образцами высокого атомарного номера и возможность использования „широкого окна“ при топометрическом исследовании.

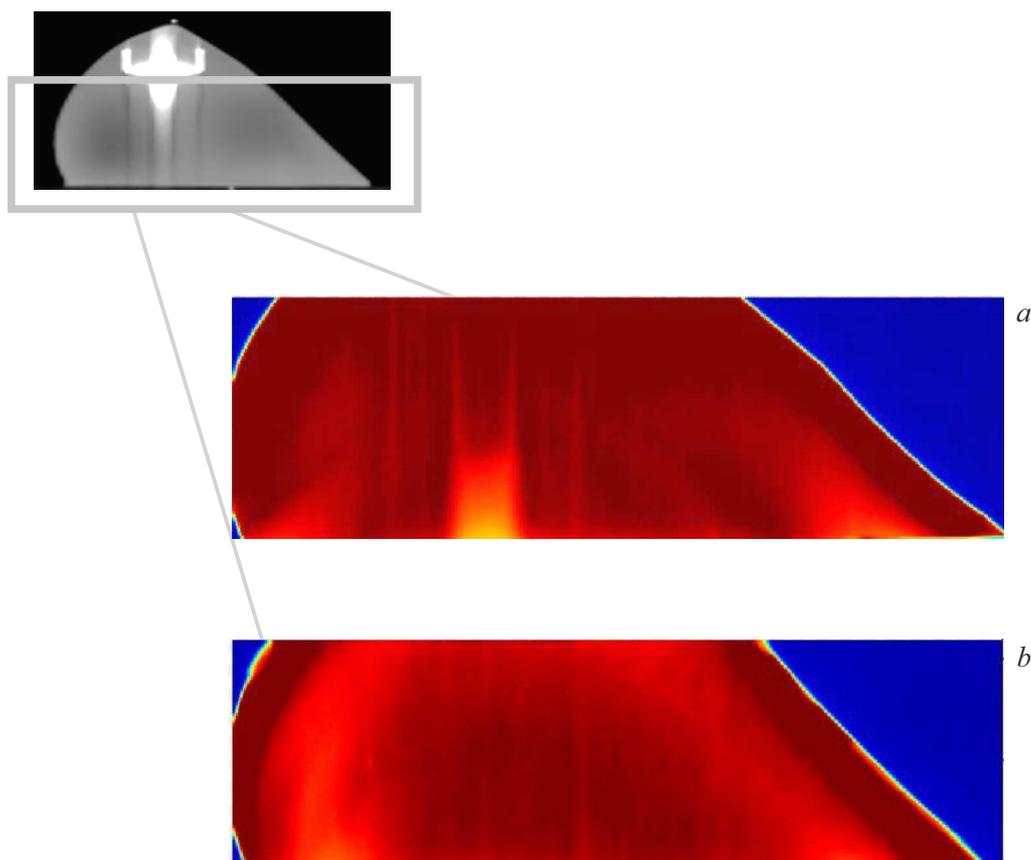
Облучение дозиметрического фантома с анатомической формой молочной железы осуществлялось на комплексе протонной терапии Proteus®PLUS, IBA (Бельгия) с применением методики тонкого сканирующего протонного пучка.

В результате проведенных измерений при первом типе дозиметрического планирования была выявлена область „провала дозы“ (рис. 3, а), которая составляет в среднем 25.1% в сторону уменьшения.



**Рис. 2.** Оконтуривание металлического клапана экспандера и окружающих анатомических структур, подверженных артефактам. 1 — кожа, 2 — мышечная ткань большой грудной мышцы, 3 — жировая ткань, 4 — металлический клапан экспандера, 5 — водная среда наполненного экспандера, 6 — мышечная ткань внутренней межреберной мышцы.

По результатам анализа дозиметрических пленок с дозовыми распределениями, полученными с применением метода дозиметрического планирования послеоперационной лучевой терапии рака молочной железы, на основе корректного топометрического оконтуривания с особым вниманием к истинной форме металлического



**Рис. 3.** Результат пленочной дозиметрии. *a* — первый тип дозиметрического планирования и область „провала дозы“; *b* — второй тип дозиметрического планирования и устранение области „провала дозы“.

клапана экспандера и плотности окружающих структур выявлено устранение области „провала дозы“ (рис. 3, *b*).

Актуальным вопросом для лучевой терапии фотонами и протонами является послеоперационное облучение рака молочной железы у пациенток с экспандером. Решением этой сложной проблемы является применение метода дозиметрического планирования послеоперационной лучевой терапии рака молочной железы с учетом влияния металлического клапана экспандера. В сравнении с фотонной лучевой терапией в протонной терапии вопрос стоит несколько более остро, так как неверно определенные плотности оказывают существенное влияние на изменение истинного пробега протонов.

Проведенные эксперименты с применением фантома анатомической формы молочной железы, имитирующие облучение молочной железы в протонной терапии, и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Без корректировки формы клапана экспандера и без учета и оценки плотности структур, подверженных артефактам, наблюдается область „провала дозы“ в районе грудной стенки, что приводит к недостаточному облучению этой области и возможным рецидивам у пациента.

2. Корректный учет формы клапана экспандера и перенормирование плотности структур способствуют оптимизации дозового распределения протонного облучения и устранению области „провала дозы“.

3. Предложенная методика дозиметрического планирования послеоперационной лучевой терапии рака молочной железы с учетом влияния металлического клапана экспандера может применяться в клинических условиях не только для протонной терапии, но и для фотонной лучевой терапии.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Ю.Д. Удалов, В.А. Киселев, А.А. Ораскина, А.М. Демидова, С.А. Владимиркин, *Вопр. онкологии*, **68** (S3), 454 (2022).
- [2] M. Zhu, K. Langen, E.I.M. Nichols, S.W. Dutta, M.W. McDonald, S.A. Patel, *Adv. Radiat. Oncol.*, **7** (1), 100825 (2021). DOI: 10.1016/j.adro.2021.100825

- [3] Е.В. Тимошкина, О.П. Трофимова, В.В. Глебовская, М.В. Черных, Т.А. Крылова, Мед. физика, № 1, 21 (2023). DOI: 10.52775/1810-200X-2023-97-1-21-32
- [4] В.Р. Панченко, Ж.С. Лебедева, А.П. Литвинов, Мед. физика, № 4, 21 (2023). DOI: 10.52775/1810-200X-2023-100-4-21-28
- [5] А.М. Демидова, С.В. Иванов, Ю.Д. Удалов, В.А. Киселев, С.Е. Гриценко, *Дозиметрический фантом с анатомической формой молочной железы*, патент на полезную модель № RU 220293 U1 (заявл. 16.05.2023; опубл. 06.09.2023).