УДК 616-006

АНАЛИЗ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ

И.Н. ЧИРКОВА[1], М.Н. ПЕТКЕВИЧ[1], Д.И. КОЗЛОВСКИЙ[1], М.В. ТУМИЛОВИЧ[2]

[1]ГУ «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова» (аг. Лесной, Республика Беларусь)
[2]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Лучевая терапия после мастэктомии при диагнозе рак молочной железы является одним из этапов лечения онкологического заболевания. Основная задача лучевого лечения состоит в минимизации дозовых нагрузок ионизирующего излучения на кожу и подкожные ткани, а также в повышении точности доставки дозы в объем опухоли. С этой целью используются вспомогательные устройства в виде болюса из тканеэквивалентных материалов. В процессе предлучевой подготовки и на этапе лучевой терапии важное значение имеет корректная фиксация болюса и выбор методики облучения. Цель работы является экспериментальное установление зависимости значения дозы ионизирующего излучения в точке на поверхности модели тела пациента от величины ошибки в воспроизведении заданных условий облучения в части корректности фиксации болюса. Результаты исследования позволили произвести оценку величины дозы ионизирующего излучения в контрольной точке с использованием различных методик моделирования распределения дозы в теле пациента при облучении поверхности грудной клетки после мастэктомии.

Ключевые слова: лучевая терапия, мастэктомия, болюс, дозовое распределение, ионизирующее излучение, неопределенность, фантом, компьютерный томограф, радиационный пучок.

DEPENDENCE OF DOSE DISTRIBUTION OF IONIZING RADIATION ON THE SELECTED METHOD FOR CALCULATING THE IRRADIATION PLAN

IRINA N. CHIRKOVA, MAKSIM N. PETKEVICH, DENIS I. KOZLOVSKIY, MIROSLAV V. TUMILOVICH

[1]N. N. Alexandrov National cancer center of Belarus (Lesnoy, Republic of Belarus)
[2]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Radiation therapy after mastectomy for breast cancer is one of the stages of cancer treatment. The main objective of radiation therapy is to minimize the dose loads of ionizing radiation on the skin and subcutaneous tissues, as well as to increase the accuracy of dose delivery to the tumor volume. For this purpose, auxiliary devices in the form of a bolus made of tissue-equivalent materials are used. In the process of pre-radiation preparation and at the stage of radiation therapy, correct fixation of the bolus and the choice of the irradiation technique are of great importance. The purpose of the work is to experimentally establish the dependence of the ionizing radiation dose at a point on the surface of the patient's body model on the error in reproducing the specified irradiation conditions in terms of the correctness of bolus fixation. The results of the study made it possible to estimate the dose of ionizing radiation at a control point using various methods for modeling the dose distribution in the patient's body during irradiation of the chest surface after mastectomy.

Keywords: radiation therapy, mastectomy, bolus, dose distribution, ionizing radiation, uncertainty, phantom, computed tomograph, radiation beam.

Введение

Лучевая терапия после мастэктомии является одним из этапов лечения и позволяет снизить количество случаев рецидивов и смертности у онкологических больных с высоким риском местно-региональной недостаточности. В последние годы с внедрением новых высокотехнологичных методов лучевой терапии, таких как лучевая терапия с модуляцией интенсивности (Intensity-modulated radiation Therapy (IMRT)) и модулированная по интенсивности арк-терапия (Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)) обеспечивается хороший баланс между предписанным дозовым покрытием и щадящим воздействием ионизирующего излучения на нормальные ткани и органы [1]. Мастэктомия представляет собой хирургическое удаление молочной железы. Как правило, резекция выполняется с прилегающими тканями: подкожно-жировым слоем, регионарными лимфатическими сосудами и узлами, в некоторых случаях с малой и большой грудной мышцей. Местный рецидив чаще всего возникает в кожных и подкожных тканях в непосредственной близости от первичного очага опухоли. Проблема переоблучения кожных покровов во время сеансов лучевой терапии, а также точность доставки дозы ионизирующего излучения и ее равномерное распределение по объему мишени существует давно и авторами предлагалось использовать вспомогательные устройства в виде болюсов для увеличения точности дозового распределения в облучаемом объеме [2].

В практике современной лучевой терапии рака молочной железы широкое применение получило использование болюсов, как виртуальных, так и физических, для снижения вероятности местных рецидивов после облучения ионизирующим излучением [3].

Физический болюс представляет собой тканеэквивалентный материал, который располагается на теле пациента во время сеансов предлучевой подготовки и лучевой терапии. Болюс – пластичный плотный нестерильный материал (например, плотный гель, парафин, силикон), который при облучении обладает свойствами кожи по своим плотностным характеристикам и предназначен для моделирования тканей человека (кожи) для изменения попадающей дозы ионизирующего излучения или глубины ее проникновения).

Виртуальный болюс – математический инструмент, позволяющий моделировать на поверхности тела пациента либо фантома тканеэквивалентный материал, который входит в область контурирования. Под контурированием понимается очерчивание границ и объемов тканей с целью дальнейшей оценки на них дозовой нагрузки ионизирующего излучения. Суть моделирования виртуального болюса состоит в построении контуров тела и объема целевого планирования (Planning Target Volume (PTV)) вокруг области грудной клетки с заданным расширением, эквивалентным по плотности, в зоне прохождения пучков излучения. Авторами работы [4] высказано предположение, что использование виртуального болюса применимо только для методик лучевого лечения 3 ДЛТ (трехмерная конформная лучевая терапия) и ЛТМИ (лучевая терапия с модуляцией интенсивности), и не подходит для методики расчета МИАТ (модулированной по интенсивности арк-терапии), так как не представляется возможным сделать отступы по телу.

В последнее время в литературе обсуждается применение физических болюсов для снижения вероятности местных рецидивов, описаны случаи успешного применения данного вспомогательного материала, когда риск местных рецидивов достаточно велик [5]. Для лечения используются методики с применением различных материалов болюса, в частности болюсы, напечатанные на 3D принтере, а также латунный сетчатый материал, позволяющий уменьшить зазор между кожей и поверхностью болюса, снизить затраты времени на укладку, а также время на облучение [6, 7]. Также авторами рассматривалась влияние толщины болюса на величину погрешности в доставке дозы [8].

Малоизученной остается проблема влияния воздушного зазора между вспомогательным материалом в виде физического болюса и облучаемой поверхностью. Авторами работы [9] было доказано, что неопределенность линейно возрастает с увеличение величины зазора, а также зависит от методики расчета плана облучения. При лучевой терапии онкологических пациентов в отделениях лучевой терапии используются протоколы на основе фотонов с адаптированным болюсом и данный метод остается наиболее распространенным методом лечения для большого числа пациентов.

На базе ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова» в клиническую практику внедрено лечение пациенток с раком молочной железы с применением болюсных материалов. В отделениях лучевой терапии активно используются болюсы производства компании CIVCO (болюс с покрытием). Данный материал представляет собой твердый гомогенный гель, плотность которого эквивалентна плотности биологических тканей и составляет 1,03 г/см3. Материал является пластичным, не провисает и не деформируется со временем.

Наиболее удобным способом оценки воздействия ионизирующего излучения на тело человека является моделирование. Для этих целей используется антропоморфный фантом. Под антропоморфным фантомом подразумевают прибор, по физическим (плотность, элементарный состав) и техническим свойствам максимально соответствующий телу человека. В литературе описаны случаи использования антропоморфного фантома Catphan 600 (PTV, Freiburg). Прибор представляет собой устройство в виде цилиндра из плотного тканеэквивалентного материала, тело фантома набрано из отдельных слоев толщиной 1 см со вставками материалов различных плотностей [11]. Также широкое применение получил антропоморфный фантом Андерсона (RCD, Gardena). Фантом представляет собой макет тела человека от головы до паховой области из плотного тканеэквивалентного материала. Тело фантома состоит из отдельных вставок толщиной 1 см с различными плотностями.

На выбор фантома влияют его физические характеристики (антропоморфность, доступность, простота укладки и фиксации на нем дополнительных изделий медицинского назначения), а также техническое оснащение отделения лучевой подготовки и лучевой терапии.

Для построения модели воздействия на человека ионизирующего облучения использовалась компьютерная система со встроенным программным обеспечением (КСПО) Eclipse версии 16.3. Данное программное обеспечение выбрано для простоты и удобства моделирования процесса облучения и является совместимым со всеми приборами и техническими модулями оборудования в отделении лучевой терапии. При помощи программного модуля Eclipse реализовываются прецизионные, клинически эффективные и щадящие для пациентов методики облучения, такие как IMRT (облучение с модуляцией интенсивности), 3D (трехмерная конформная лучевая терапия), VMAT (модулированная по интенсивности арк-терапия).

Целью данной работы является экспериментальное установление зависимости значения дозы ионизирующего излучения в точке на поверхности модели тела пациента от величины ошибки в воспроизведении заданных условий облучения в части корректности фиксации болюса.

Методика проведения эксперимента

В основе метода оценки методик облучения при лучевой терапии с болюсом использовалось оборудование и программное обеспечение отдела по инженерному обеспечению РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова.

С использованием компьютерного томографа Aquilion Lightning производства компании Canon получена томограмма антропоморфного фантома Catphan с шагом 2,5 мм, реконструированная до толщины среза в 1,25 мм. Полученная томограмма импортирована в компьютерную систему планирования облучения Eclipse (рисунок 1). Антропоморфность фантома позволяет при помощи встроенных инструментов изображать на нем целевые объемы (в данном случае PTV - Planning Target Volume или планируемый объем мишени), как в соответствии с международными рекомендациями по оконтурированию, так и согласно национальным локальным протоколам и требованиям [ICRU].

За объем PTV в фантоме выбран верхний левый квадрат, ширина и длина PTV оконтурирована размером 5 см, что соответствует размеру болюса, который используется на аппарате лучевой терапии при лечении пациентов после мастэктомии, глубина PTV - 5 см. Следует отметить, что планируемый объем мишени изображен близко к краю фантома, имитируя ситуацию расположения очага опухли непосредственно на коже. В виртуальную модель фантома также включена такая структурная модель как болюс, оконтурированная с использованием соответствующего программного модуля КСПО Eclipse. Полученный набор

структур можно использовать для создания дозиметрических планов облучения любой методикой из применяемых в практике в отделениях лучевой терапии. Далее с использованием встроенного программного обеспечения созданы планы облучения по различным методикам расчета. При этом направление радиационного пучка от линейного ускорителя при каждой методике расчета оставалось неизменным. Также на поверхности фантома выбрана контрольная точка для оценки дозы, расположенная в центре PTV на поверхности фантома.

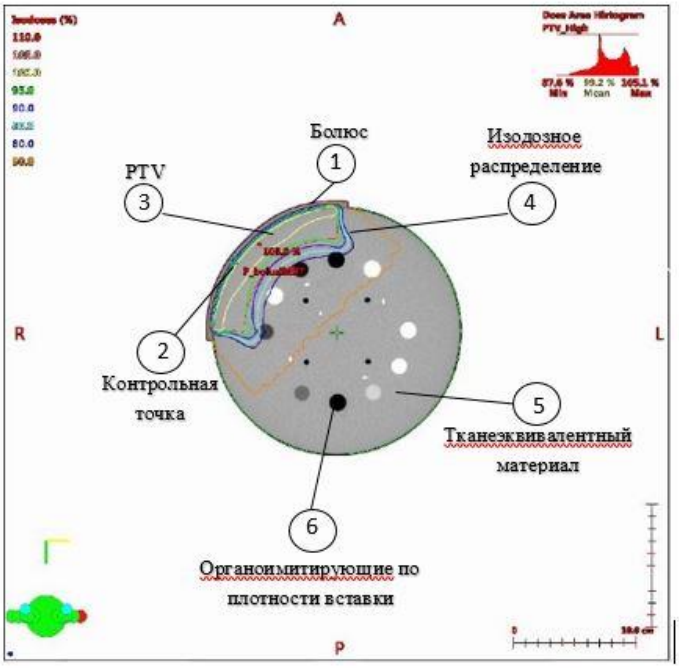

Рис. 1. Скан антропоморфного фантома Catphan с указанием структур: 1– болюс, 2 – контрольная точка, 3 – PTV, 4 – изодозное распределение, 5 – тканеэквивалентный материал

При помощи программного модуля Eclipse менялось положение болюса, создавая погрешность его укладки путем искусственно созданного зазора между болюсом и поверхностью фантома с шагом 1 мм от 0 до 1 см. Оценка доставленной дозы и дозового распределения проводилась в выбранной контрольной точке для каждой методики расчета.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований установлена зависимость дозы в контрольной точке от величины ошибки в воспроизведении заданных условий облучения в части корректности фиксации болюса (рисунок 2).

Анализ дозиметрических параметров модели распределения дозы ионизирующего излучения в контрольной точке в объеме мишени, полученных при моделировании планирующей системой Eclipse, показал возможность применения всех методик расчета для облучения поверхности грудной клетки. Для каждой из методик с увеличением расстояния между болюсом и поверхностью фантома, возникает ошибка, связанная с некорректной фиксацией болюса. При наличии зазора между болюсом и поверхностью в пределах 0–0,5 см значение дозы в контрольной точке линейно увеличивается, но при этом ухудшается и дозовое распределение в объеме PTV, а именно, увеличивается максимум ионизации на поверхности на 15 %, что в реальных условиях ведет к нарушению заданных условий облучения и может привести к незапланированному переоблучению кожных покровов и близлежащих органов и тканей. При наличии зазора в пределах 0,5–1 см величина дозы излучения в контрольной точке существенно снижается (23 %), а также наблюдается значительные отклонения в распределении дозы излучения по объему облучаемой мишени (16 %), что приводит к

нарушению заданных условий облучения, и как следствие, отсутствию запланированного эффекта от лечения.

.**Рис. 2.** Значение дозы ионизирующего излучения в контрольной точке на поверхности тела фантома от плотности прилегания болюса

Для тех случаев, когда болюс не использовался, доза ионизирующего излучения в контрольной точке оказалась меньше запланированной на 73 – 76 %, что обуславливает использование вспомогательного материала при лечении пациентов с раком молочной железы.

Плотное прилегание болюса к поверхности облучаемого объема обеспечивает получение значений дозы ионизирующего излучения в контрольной точке на 75 – 80 % соответствующее запланированному и охват мишени составляет 95 % от предписанной дозы.

Заключение

Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, позволяют сделать вывод о приемлемости использования всех применяемых на практике в отделении лучевой терапии методик расчета дозиметрических планов с использованием болюса. При этом основной вклад в ошибки при отпуске дозы вносит некорректное воспроизведении заданных условий облучения в части фиксации болюса. Правильная и плотная фиксация болюса позволяет получить дозу в контрольной точке на поверхности на уровне 75 – 80 % от соответствующей запланированной.

По результатам работы сформулировано дальнейшее направление исследования – разработка методики воспроизведения заданных условий облучения в части корректности фиксации болюса.

Список литературы

1. Глебовская, В.В. Нужны ли сложные технологии лучевой терапии в лечении больных раком молочной железы после радикальной мастэктомии? Клинический случай / В.В. Глебовская, Е.В. Тимошкина, О.П. Трофимова // Онкологический журнал. – 2022. -Т.5, №2, С. 89–100.
2. Abel, S. Local failure and acute radiodermatological toxicity in patients undergoing radiation therapy with and without postmastectomy chest wall bolus: Is bolus ever necessary / S. Abel, P. Renz, M. Trombetto // Practical radiation oncology. – 2017. – Vol.7, iss 3. – P.167–172.

3. Стуров, А.В. О возможности изменения изодозного распределения в лучевой терапии / А.В. Струков, А.О. Нештак, С.Ф. Четвериков // Медицина и здравоохранение: материалы III Международной научной конференции, Казань, май 2015 г.: Бук /редкол.: Г.Д. Ахметова, Г.А. Кайнова, Е.И. Осянина. – Казань, 2015. – С.25–28.
4. Ugurlu, T. The effect of using virtual bolus on VMAT plan quality for left-sided breast cancer patients / T. Ugurlu, C. Akbas, // Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – Vol. 189.
5. Kadar-Person, O. A Delfi study and International Consensus Recommendation: The use of bolus in the setting of postmastectomy radiation therapy for early breast cancer / O. Kadar-Person, HM. Dahn, N. Bese // Critical Reviews in Oncology/Hematology. – 2021. – Vol.164. – P.115–121.
6. Lu, Y. 3D Printing Polymer-based Bolus Used for Radiotherapy / Y.Lu, J. Song // National Library of Medicine. – 2021. – Vol.7, №414, – P. 27-42.
7. Sakai, Y., Double enhancement effect of a surface dose with tungsten rubber bolus in photon radiotherapy for keloids and superficial tumors / Y. Sakai, H. Monzen, M. Tamuro // Physical and engineering sciences in medicine. – 2023. – Vol.46, №1. – P. 179–184.
8. Mieville, F., Post-mastectomy radiotherapy: Impact of bolus thickness and irradiation technique on skin dose / F. Mieville, N. Pitteloud, V. Achard // Journal of Medical Physics. – 2023. –Vol. 46, – P. 1-13.
9. Tang, Ch. Quantify the Effect of Air Gap Errors on Skin Dose for Breast Cancer Radiotherapy / Ch. Tang, J. Yuan, // Technology in Cancer Research and Treatment. – 2023. – P. 1-13.
10. Гольдман, Е.И. Использование антропоморфного фантома тела человека для осуществления комплексного тестирования технологического процесса лучевой терапии / Е.И. Гольдман, Е.В. Титович // Доклады БГУИР. – 2019. – №7–8. –С.133–140.
11. Возможности использования анатомических пластинатов в качестве антропоморфных фантомов: сб. тр. / Всероссийская научно-практическая конф. Радиационная гигиена: итоги и перспективы; редколл.: Т. Б. Балтруковой (отв. ред.). – Санкт-Петербург: Северо-Западный медицинский университет, 2022. – С. 6 –7.