



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-95-101>

УДК 616-006

ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ БОЛЮСА НА ВЕЛИЧИНУ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЛУЧЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ

И. Н. ЧИРКОВА^{1,2}, М. В. ТУМИЛОВИЧ²

¹Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии
имени Н. Н. Александрова (Минский район, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Основная цель лучевой терапии – подведение дозы ионизирующего излучения к опухоли. При облучении очагов, расположенных на поверхности кожи либо на небольшой глубине, возникает проблема переоблучения здоровых тканей. С целью оптимизации распределения дозы ионизирующего излучения в практике лечения используются вспомогательные устройства в виде болусов. При этом важное значение имеет корректная фиксация болуса, обеспечивающая его плотное прилегание. Экспериментально доказано повышение качества дозового распределения при плотной фиксации болуса. Получены численные значения дозы в контрольной точке при различной плотности прилегания болуса с применением разных методик расчета планов облучения.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Чиркова, И. Н. Влияние положения болуса на величину дозы ионизирующего излучения при моделировании облучения на линейном ускорителе / И. Н. Чиркова, М. В. Тумилович // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 3. С. 95–101. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-95-101>.

EFFECT OF BOLUS POSITION ON THE DOSE OF IONIZING RADIATION IN A LINEAR ACCELERATOR SIMULATION

IRINA N. CHIRKOVA^{1,2}, MIROSLAV V. TUMILOVICH²

¹N. N. Aleksandrov National Cancer Center of Belarus (Minsk Region, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The main goal of radiation therapy is to deliver a dose of ionizing radiation to a tumor. When irradiating foci located on the skin surface or at a shallow depth, the problem of overirradiation of healthy tissues arises. In order to optimize the distribution of the dose of ionizing radiation, auxiliary devices in the form of boluses are used in treatment practice. In this case, correct fixation of the bolus, ensuring its tight fit, is of great importance. An increase in the quality of dose distribution with tight fixation of the bolus has been experimentally proven. Numerical values of the dose at the control point with different bolus fit density have been obtained using different methods for calculating irradiation plans.

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

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Chirkova I. N., Tumilovich M. V. (2025) Effect of Bolus Position on the Dose of Ionizing Radiation in a Linear Accelerator Simulation. *Doklady BGUIR*. 23 (3), 95–101. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-3-95-101> (in Russian).

Введение

Лучевая терапия опухолей, расположенных на поверхности кожи либо близко к поверхности, имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. Эффективность радиационного луча с медицинской точки зрения коррелирует с распределением дозы по глубине и характеристиками рассеянного излучения. Распределение дозы в радиационных пучках различных видов излучения в зависимости от глубины изображено на рис. 1. Анализ данных показывает, что максимум ионизации для фотонов располагается на некоторой глубине от поверхности, что в реальных условиях может привести к переоблучению здоровых органов и тканей, а также спровоцировать некорректный подвод дозы ионизирующего излучения к очагу опухоли [1].

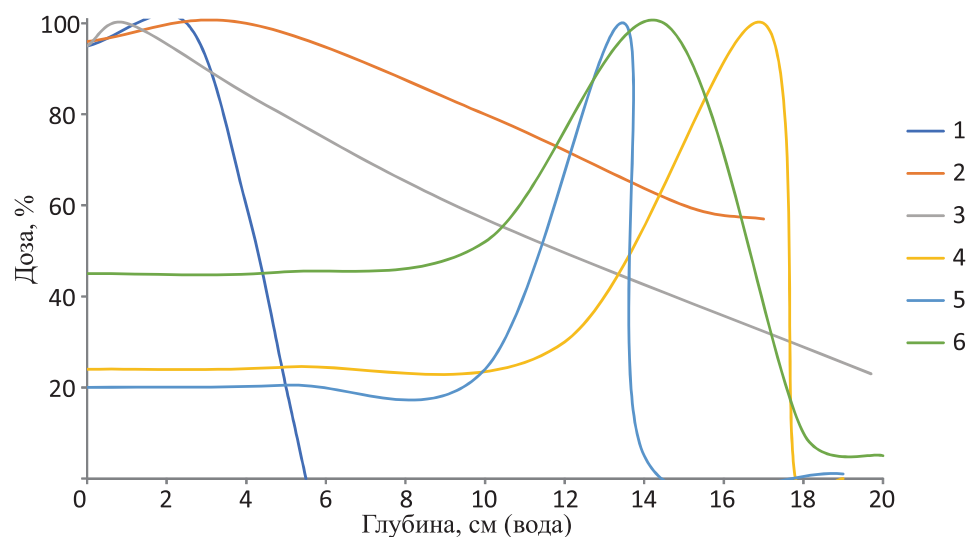


Рис. 1. Зависимость распределения дозы ионизирующего излучения в пучках различных видов излучения от глубины в воде: 1, 3 – электроны и нейтроны с энергией 2,5 и 30 МэВ соответственно; 2 – фотоны с максимальной энергией 25 МэВ; 4 – протоны с энергией 160 МэВ; 5 – ионы ^{12}C с энергией 250 МэВ/нуклон; 6 – пучок π^- мезонов

Fig. 1. Dependence of the distribution of the dose of ionizing radiation in beams of different types of radiation on the depth in water: 1, 3 – electrons and neutrons with energies of 2.5 and 30 MeV, respectively; 2 – photons with a maximum energy of 25 MeV; 4 – protons with an energy of 160 MeV; 5 – ^{12}C ions with an energy of 250 MeV/nucleon; 6 – beam of π^- mesons

На практике в лучевой терапии для минимизации последствий некорректной доставки дозы в опухолевую мишень принято применять вспомогательное устройство в виде болюса. Болюс – вспомогательное устройство, используемое в лучевой терапии для изменения дозы ионизирующего излучения, доставляемой на кожу или поверхностные ткани. Болюс действует как дополнительный слой ткани, позволяя более эффективно доставлять дозу ионизирующего излучения в объем опухоли, которая расположена вблизи либо на поверхности кожи, а также выравнивать дозу по неровным поверхностям тела пациента. Без использования болюса ионизирующее излучение проникает на большую глубину, не затронув предписанный объем облучения. Болюс переносит максимальную дозу ионизирующего излучения ближе к поверхности, что делает его эффективным для лечения поверхностных новообразований [2].

Наиболее частыми локализациями, при лечении которых применяются болюсы, являются:

- поверхностные опухоли (рак кожи, где для лечения требуется высокая поверхностная доза ионизирующего излучения);
- лечение опухолей, расположенных на неровных поверхностях (нос, уши, где болюс применяется для выравнивания объема облучения для равномерного распределения дозы ионизирующего излучения);
- послеоперационное лечение (в случаях, когда опухоль была удалена хирургическим путем и целью лучевого лечения является воздействие ионизирующим излучением на место операции, где могут остаться раковые клетки).

Сегодня в отделениях лучевой терапии активно применяются болюсы, как виртуальные, так и физические, с целью снижения вероятности местных рецидивов после воздействия на ткани ионизирующим излучением. Под физическим болюсом подразумевают тканеэквивалентный материал, который располагается на теле пациента во время сеансов предлучевой подготовки и лучевой терапии. Такой болюс представляет собой пластичный плотный нестерильный материал (например, плотный гель, парафин, силикон), который при облучении обладает свойствами кожи по своим плотностным характеристикам и используется для моделирования тканей человека (кожи) с целью изменения попадающей дозы ионизирующего излучения или глубины ее проникновения.

Виртуальный болюс – это математический инструмент, позволяющий моделировать на поверхности тела пациента либо фантома тканеэквивалентный материал, который вносится в область контурирования [3]. Под контурированием подразумевается очерчивание границ и объемов тканей для 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 облучения с заданным расширением, эквивалентным по плотности, в зоне прохождения радиационного пучка [4]. В [5] выдвинута гипотеза о том, что использование виртуального болюса применимо только для методик лучевого лечения 3D (трехмерная конформная лучевая терапия) и IMRT (лучевая терапия с модуляцией интенсивности) и не подходит для методики расчета VMAT (модулированной по интенсивности арк-терапии), так как не представляется возможным сделать отступы по телу.

На этапе предлучевой подготовки физический болюс располагается на теле пациента, после чего плотно фиксируется. Происходит процесс сканирования пациента на компьютерном томографе, затем данные передаются в систему планирования облучения со встроенным программным обеспечением. При помощи встроенных функций отсканированный физический болюс связывается с виртуальным болюсом – математическим инструментом системы.

В последнее время в литературе обсуждается применение физических болюсов для снижения вероятности местных рецидивов, описываются случаи успешного применения вспомогательного материала, когда риск местных рецидивов достаточно велик [6]. В онкологических диспансерах сейчас 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 [7, 8]. В [9] рассматривалось влияние толщины болюса на величину погрешности в доставке дозы.

Малоизученным остается вопрос влияния воздушного зазора между вспомогательным материалом в виде физического болюса и облучаемой поверхностью. В [10] установлено, что неопределенность линейно возрастает с увеличением зазора, а также зависит от методики расчета плана облучения, толщины болюса и материала, из которого он изготовлен. При лучевой терапии онкологических пациентов в отделениях лучевой терапии используются протоколы на основе фотонов с адаптированным болюсом, и данный метод остается наиболее распространенным в лечении большого числа пациентов [11].

Практически применимым способом оценки воздействия ионизирующего излучения на тело человека является моделирование. С этой целью используется антропоморфный фантом. Антропоморфный фантом – прибор, по своим 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 описаны случаи применения антропоморфного фантома Андерсона (RCD, Gardena). Данный фантом – 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. Программное обеспечение выбиралось для простоты и удобства моделирования процесса облучения и было совместимо со всеми устройствами и техническими модулями оборудования отделения лучевой терапии. При помощи Eclipse реализовываются прецизионные, клинически эффективные и щадящие для пациентов методики облучения, такие как IMRT, 3D, VMAT.

При проведении исследований экспериментально установлена зависимость величины дозы ионизирующего излучения в точке на поверхности модели тела пациента при нарушении заданных условий облучения в части корректности фиксации болюса от различной толщины вспомогательного материала.

Методика проведения эксперимента

В основе оценки методик облучения при лучевой терапии с болюсом применялось оборудование и программное обеспечение отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова. Блок-схема эксперимента по оценке дозы ионизирующего излучения в контрольной точке представлена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема эксперимента по оценке дозы ионизирующего излучения в контрольной точке
Fig. 2. Block diagram of an experiment to reduce the dose of an ionizing device at a control point

На компьютерном томографе Aquilion Lightning (Canon) получена томограмма антропоморфного фантома Catphan с шагом 2,5 мм, реконструированная до толщины среза в 1,25 мм (рис. 3). Томограмму импортировали в компьютерную систему планирования облучения Eclipse. Антропоморфность фантома позволяет при помощи встроенных инструментов изображать на нем целевые объемы (в данном случае – PTV) как в соответствии с международными рекомендациями по оконтуриванию, так и согласно национальным локальным протоколам и требованиям (ICRU).

За объем PTV в фантоме выбран верхний левый квадрат, ширина и длина PTV оконтуривана 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 на рис. 3 изображен близко к краю фантома, имитируя ситуацию расположения очага опухоли непосредственно на коже. В виртуальную модель фантома также включена такая структурная модель, как болюс, оконтуриванная 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 помощью встроенного программного обеспечения создавались планы облучения по различным методикам расчета. При этом направление радиационного пучка от линейного ускорителя при каждой методике расчета оставалось неизменным. Также на поверхности фантома была выбрана контрольная точка для оценки дозы, расположенная в центре PTV на поверхности.

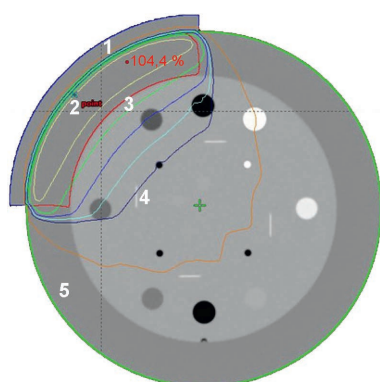


Рис. 3. Скан антропоморфного фантома Catphan с указанием структур: 1 – болюс; 2 – контрольная точка; 3 – PTV; 4 – изодозное распределение; 5 – тканеэквивалентный материал
Fig. 3. Scan of the anthropomorphic phantom Catphan indicating the structures: 1 – bolus; 2 – control point; 3 – PTV; 4 – isodose distribution; 5 – tissue equivalent material

При помощи встроенных инструментов 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 для болюса толщиной 0,5 и 1,0 см [4].

Результаты исследований и их обсуждение

В результате моделирования процесса облучения была установлена зависимость дозы ионизирующего излучения в контрольной точке от величины ошибки в воспроизведении заданных условий облучения в части корректности фиксации болюса при двух различных толщинах вспомогательного материала (рис. 4).

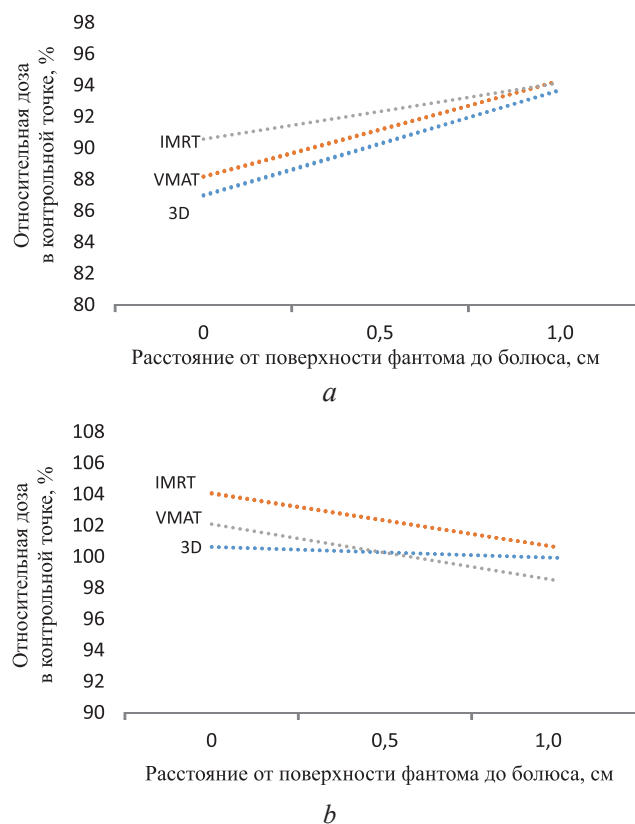


Рис. 4. Зависимость дозы ионизирующего излучения в контрольной точке на поверхности тела фантома от положения болюса толщиной, см: $a - 0,5$; $b - 1,0$
Fig. 4. Dependence of the ionizing radiation dose at the control point on the surface of the phantom body on the position of the bolus thickness, cm: $a - 0.5$; $b - 1.0$

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 поверхностных опухолей как в случае использования болюса толщиной 0,5 см, так и при его толщине 1,0 см. 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 – на 15 % увеличивается максимум ионизации на поверхности, 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 0,5–1,0 см величина дозы излучения в контрольной точке существенно уменьшается (23 %). Также наблюдаются значительные отклонения в распределении дозы излучения по объему облучаемой мишени (16 %), что приводит к нарушению заданных условий облучения, и как следствие, к отсутствию запла-

нированного эффекта от лечения. Установлено, что доза в контрольной точке имеет большие значения (10–15 %) в случае применения болуса меньшей толщины, что обуславливает использование более толстого болуса для очагов облучения, расположенных на поверхности либо близко к поверхности. Для очагов, расположенных на небольшой глубине от поверхности, целесообразно использовать более тонкий болус. Для тех случаев, когда болус не использовался, доза ионизирующего излучения в контрольной точке оказалась меньше запланированной на 73–76 %, что обуславливает использование вспомогательного материала в целом. Плотное прилегание болуса 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

1. Результаты исследования подтверждают возможность применения на практике в отделении лучевой терапии методик расчета дозиметрических планов с использованием болуса. При этом основной вклад в ошибки при отпуске дозы вносит некорректное воспроизведение заданных условий облучения при фиксации болуса. Правильная и плотная его фиксация позволяет получить дозу в контрольной точке на поверхности на уровне 75–80 % от запланированной.

2. Определено дальнейшее направление исследования – разработка методики воспроизведения заданных условий облучения в части корректности фиксации болуса.

Список литературы

1. Ратнер, Т. Г. Клиническая дозиметрия. Физико-технические основы / Т. Г. Ратнер, И. М. Лебеденко, 2-е изд. М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «Москов. инж.-физ. ин-т», 2022. С. 47–49.
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. Trombetta // Practical Radiation Oncology. 2017. Vol. 7, Iss. 3. P. 167–172.
3. 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, H. M. Dahn, N. Bese // Critical Reviews in Oncology // Hematology. 2021. Vol. 164. P. 115–121.
4. Чиркова, И. Н. Анализ дозиметрических параметров модели распределения дозы ионизирующего излучения при моделировании облучения поверхности грудной клетки / И. Н. Чиркова, М. Н. Петкевич, М. В. Тумилович // Медэлектроника–2024: сб. науч. ст. XVI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 5–6 дек. 2024 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиозлек., 2024. С. 260–265.
5. 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. P. 179–184.
6. 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, No 1. P. 179–184.
7. Стуров, А. В. О возможности изменения изодозного распределения в лучевой терапии / А. В. Стуров, А. О. Нештак, С. Ф. Четвериков // Медицина и здравоохранение: матер. III Междунар. науч. конф., Казань, май 2015 г. Казань, 2015. С. 25–28.
8. Mievil, F., Post-Mastectomy Radiotherapy: Impact of Bolus Thickness and Irradiation Technique on Skin Dose / F. Mievil, N. Pitteloud, V. Achard // Journal of Medical Physics. 2023. Vol. 46. P. 1–13.
9. Quantify the Effect of Air Gap Errors on Skin Dose for Breast Cancer Radiotherapy / C. Tang [et al.] // Technology in Cancer Research & Treatment. 2024. Vol. 23. DOI: 10.1177/15330338241258566.
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 пластиналов в качестве антропоморфных фантомов // Радиационная гигиена: итоги и перспективы: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф., 18 мая 2022 г. СПб.: Сев.-Зап. гос. мед. ун-т им. И. И. Мечникова, 2022. С. 6–7.

Поступила 08.04.2025

Принята в печать 27.05.2025

References

1. Ratner T. G., Lebedenko I. M. (2022) *Clinical Dosimetry. Physical and Technical Foundations*. Moscow, National Research Nuclear University “Moscow Engineering Physics Institute”. 47–49.

2. Abel S., Renz P., Trombetta M. Local (2017) Failure and Acute Radiodermatological Toxicity in Patients Undergoing Radiation Therapy with and Without Postmastectomy Chest Wall Bolus: Is Bolus Ever Necessary. *Practical Radiation Oncology*. 7 (3), 167–172.
3. Kadar-Person O., Dahn H. M., Bese N. (2021) A Delfi Study and International Consensus Recommendation: The Use of Bolus in the Setting of Postmastectomy Radiation Therapy for Early Breast Cancer. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*. 164, 115–121.
4. Chirkova I. N. (2024) Dependence of Dose Distribution of Ionizing Radiation on the Selected Method for Calculating the Irradiation Plan. *Collection of Scientific Articles of the XVI International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 5–6*. Minsk, Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics. 260–265 (in Russian).
5. Ugurlu T., Akbas C. (2022) The Effect of Using Virtual Bolus on VMAT Plan Quality for Left-Sided Breast Cancer Patients. *Applied Radiation and Isotopes*. 189, 179–184.
6. Sakai Y., Monzen H., Tamuro M. (2023) Double Enhancement Effect of a Surface Dose with Tungsten Rubber Bolus in Photon Radiotherapy for Keloids and Superficial Tumors. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*. 46 (1), 179–184.
7. Sturov A. V., Neshtjak S. F., Chetverikov S. F. (2015) On the Possibility of Changing the Isodose Distribution in Radiation Therapy. *Medicine and Healthcare, Proceedings of the III International Scientific Conference*. Kazan. 25–28 (in Russian).
8. Mievillie F., Pitteloud N., Achard V. (2023) Post-Mastectomy Radiotherapy: Impact of Bolus Thickness and Irradiation Technique on Skin Dose. *Journal of Medical Physics*. 46, 1–13.
9. Tang C., Yuan J., Guo H., Dai Z., Liu B., Xi H., et al. (2024) Quantify the Effect of Air Gap Errors on Skin Dose for Breast Cancer Radiotherapy. *Technology in Cancer Research & Treatment*. 23. DOI: 10.1177/15330338241258566.
10. Goldman E. I., Titovich E. V. (2019) Human Body Anthropomorphic Phantom Utilisation for the Complex Testing of Radiation Therapy Technological Process. *Doklady BGUIR*. 7–8, 133–140 (in Russian).
11. Possibilities of Using Anatomical Plastinates as Anthropomorphic Phantoms. *Radiation Hygiene: Results and Prospects: Collection of Works of the All-Russian Scientific and Practical Conference, 18 May 2022*. Saint Petersburg, North-Western State Medical University named after I. I. Mechnikov. 6–7.

Received: 8 April 2025

Accepted: 27 May 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Чиркова И. Н., вед. мед. физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии, Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова; асп., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Тумилович М. В., д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-11
E-mail: irinagutkovskaya@gmail.com
Чиркова Ирина Николаевна

Information about the authors

Chirkova I. N., Leading Medical Physicist, Department of Radiation Therapy Engineering, N. N. Aleksandrov National Cancer Center of Belarus; Post-graduate, Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

Tumilovich M. V., Dr. Sci. (Tech), Professor, Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-11
E-mail: irinagutkovskaya@gmail.com
Chirkova Irina Nikolaevna