

Усаров Мухриддин Шухратович¹<https://orcid.org/0009-0000-9733-1866>

Уринов Мухаммад Абдукаххорович²

1. Ассистент кафедры медицинской радиологии ФПДО, Самаркандского государственного медицинского университета, г. Самарканд, Узбекистан
2. Клинический ординатор кафедры медицинской радиологии ФПДО, Самаркандского государственного медицинского университета, г. Самарканд, Узбекистан

СРАВНЕНИЕ ПРОТОННОЙ И ФОТОННОЙ ТЕРАПИИ: ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЕ ПРЕИМУЩЕСТВО И ОБОСНОВАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО ВЫБОРА

Аннотация: Лучевая терапия (ЛТ) является одним из основных методов лечения онкологических заболеваний. С развитием технологий, помимо традиционной фотонной ЛТ (рентгеновские лучи, IMRT/VMAT), все большее распространение получает протонная терапия (ПТ) – форма лечения тяжелыми заряженными частицами. В статье проводится сравнительный анализ физических основ и дозиметрических профилей фотонов и протонов. Основное внимание уделяется Пик Брэгга протонов и его способности обеспечивать высокую конформность дозы. Обсуждаются ключевые клинические сценарии (педиатрическая онкология, опухоли у критических структур, повторное облучение), где дозиметрическое преимущество ПТ транслируется в значительное снижение острой и отдаленной токсичности, улучшая долгосрочное качество жизни пациентов.

Ключевые слова: Протонная терапия, Фотонная терапия, Пик Брэгга, IMRT, SBRT, Дозиметрия, Лучевая онкология, Педиатрический рак, Токсичность, Терапия частицами.

Usarov Muxriddin Shuxratovich¹

Urinov Muhammad Abduqahhorovich²

1. Samarqand davlat tibbiyot universiteti
DKTF Tibbiy radiologiya kafedrasida assistenti
Samarqand, Uzbekiston
2. Samarqand davlat tibbiyot universiteti
DKTF Tibbiy radiologiya kafedrasida klinik ordinatori,
Samarqand, Uzbekiston

PROTON VA FOTON TERAPIYASINI TAQQOSLASH: DOZIMETRIK AFZALLIK VA KLINIK TANLOVNING ASOSLARI

Annotatsiya: Nur terapiyasi (NT) onkologik kasalliklarni davolashning asosiy usullaridan biri hisoblanadi. Texnologiyalar rivojlanishi bilan an'anaviy fotonli NT (rentgen nurlari, IMRT/VMAT) bilan bir qatorda, proton terapiyasi (PT) - og'ir zaryadlangan zarrachalar bilan davolash usuli tobora keng tarqalmoqda. Ushbu maqolada foton va protonlarning fizik xususiyatlari va dozimetrik profilari qiyosiy tahlil qilingan. Asosiy e'tibor protonlarning Bregg cho'qqisiga va uning yuqori darajadagi doza moslashuvchanligini ta'minlash. Asosiy klinik vaziyatlar (pediatrik onkologiya, kritik tuzilmalardagi o'smalar, takroriy nurlanish) muhokama etiladi. Bu holatlarda proton

terapiyasining dozimetrik afzalligi o'tkir va uzoq muddatli zaharlanishni sezilarli darajada kamaytiradi, natijada bemorlarning uzoq muddatli hayot sifati yaxshilanadi.

Kalit so'zlar: Proton terapiyasi, Foton terapiyasi, Bregg cho'qqisi, IMRT, SBRT, Dozimetriya, Nurlanish onkologiyasi, Pediatrik saraton, Zaharlilik, Zarracha terapiyasi.

Usarov Mukhriddin Shukhratovich¹

Urinov Muhammad Abduqahhorovich²

1. Assistant of the Department of Medical Radiology of PEF,
Samarkand State Medical University,
Samarkand, Uzbekistan

2. Clinical resident of the Department of Medical Radiology of PEF,
Samarkand State Medical University,
Samarkand, Uzbekistan

COMPARISON OF PROTON AND PHOTON THERAPY: DOSIMETRIC ADVANTAGE AND JUSTIFICATION OF CLINICAL CHOICE

Abstract: Radiation therapy (LT) is one of the main methods of treating oncological diseases. With the development of technology, in addition to traditional photon LT (X-rays, IMRT/VMAT), proton therapy (PT) - a form of treatment with heavy charged particles - is becoming increasingly widespread. The article provides a comparative analysis of the physical basis and dosimetric profiles of photons and protons. The main focus is on Bregg's proton peak and its ability to ensure high dose conformity. Key clinical scenarios (pediatric oncology, tumors in critical structures, repeated radiation exposure) are discussed, where PT's dosimetric advantage translates into a significant reduction in acute and long-term toxicity, improving patients' long-term quality of life

Keywords: Proton therapy, Photon therapy, Bregg peak, IMRT, SBRT, Dosimetry, Radiation oncology, Pediatric cancer, Toxicity, Particle therapy.

Введение: Эволюция Лучевой Терапии

Лучевая терапия претерпела значительную эволюцию от двухмерного облучения к высокоточному конформному облучению. Современная фотонная терапия (ФТ) в лице IMRT (Intensity-Modulated Radiation Therapy) и VMAT (Volumetric Modulated Arc Therapy) позволяет достичь высокой конформности дозы вокруг опухоли. Однако, даже самые совершенные фотонные методы неизбежно облучают здоровые ткани, расположенные за мишенью.

На этом фоне протонная терапия (ПТ) предлагает радикально иной дозиметрический профиль, основанный на физических свойствах заряженных частиц, что потенциально может обеспечить лучшее сохранение критически важных органов (Organ-at-Risk, OAR).

Физические Основы Дозиметрического Преимущества

Фотонная лучевая терапия использует электромагнитное излучение (рентгеновские или гамма-лучи). Основной принцип заключается в том, что фотоны, проходя через ткань, постепенно ослабляются, при этом максимальная доза облучения приходится на небольшой участок под поверхностью кожи, а затем доза медленно снижается по мере прохождения луча через тело.

Современные технологии фотонной терапии

3D-CRT обеспечивает базовую конформность, однако ограничена по способности обходить критические структуры.

IMRT позволяет значительно уменьшить дозу на ОР: например, при опухолях головы и шеи снижение дозы на околоушные железы приводит к уменьшению частоты радиационного сиаладенита на 30–50%.

VMAT даёт сопоставимую или лучшую конформность по сравнению с IMRT, сокращает время процедуры до 2–4 минут и снижает интегральную дозу.

IGRT (kV-СВСТ, EPID) повышает точность позиционирования до 1–2 мм, а MR-линейные ускорители обеспечивают визуализацию мягких тканей в реальном времени.

SBRT/SRT — стереотаксическая фотонная терапия. Метод подразумевает доставку очень высокой дозы в 1–5 фракциях.

Дозиметрический профиль: Фотонный пучок всегда проходит насквозь через опухоль и выходит за её пределы, облучая при этом здоровые ткани, расположенные как до, так и после мишени.

Технологии: Современные методы, такие как лучевая терапия с модулированной интенсивностью (IMRT) и объемно-модулированная арк-терапия (VMAT), позволяют оптимизировать распределение дозы и уменьшить облучение критических органов за счет использования множества полей и сложной геометрии пучков, но не могут полностью устранить «сквозную» дозу.

Протонная Терапия

Протонная терапия относится к корпускулярной лучевой терапии и использует пучки протонов – положительно заряженных частиц. Ключевое дозиметрическое преимущество протонов связано с их уникальным физическим свойством: пиком Брэгга.

- **Пик Брэгга:** По мере прохождения протонов через ткань они замедляются и выделяют основную часть своей энергии (т.е. максимальную дозу) в очень узкой, точно контролируемой области непосредственно перед своей остановкой (называемой пиком Брэгга). После этого пика доза резко падает практически до нуля.

- **Дозиметрический профиль:** Этот механизм позволяет подвести максимально высокую и конформную дозу к опухоли, при этом минимизируя или полностью исключая облучение здоровых тканей, расположенных за пределами опухоли.

Сравнение распределения дозы:

Фотонный пучок (синяя линия): Проходит сквозь тело, постепенно теряя энергию и облучая ткани перед опухолью и за ней.

Протонный пучок (красная линия): Максимально концентрирует энергию в области опухоли (Пик Брэгга), практически не облучая ткани, расположенные дистальнее.

Рисунок 1: Дозиметрические преимущества и клиническое значение

Характеристика	Фотонная Терапия (IMRT/VMAT)	Протонная Терапия
Физический принцип	Ослабление электромагнитного излучения	Пик Брэгга (заряженные частицы)
Доза перед опухолью	Значительная	Умеренная (на пути к пику Брэгга)
Доза за опухолью	Значительная («Сквозная» доза)	Практически нулевая
Конформность дозы	Высокая (но ограничена сквозной дозой)	Чрезвычайно высокая (использование Пика Брэгга)
Риск вторичных опухолей	Выше (за счет облучения большего объема здоровой ткани)	Ниже
Возможность эскалации дозы	Ограничена толерантностью критических органов	Выше (за счет защиты критических органов)

Клиническая значимость представленных профилей выражается в более высоком уровне защиты критических органов при применении протонной терапии, что особенно важно в педиатрии, лечении опухолей основания черепа, новообразований вблизи жизненно важных структур, а также в сценариях повторного облучения. Данная визуализация обоснованно демонстрирует физическую основу преимуществ протонной терапии и подчеркивает её потенциал в снижении токсичности по сравнению с фотонными методами.

Клиническое Преимущество

Дозиметрические преимущества протонов непосредственно трансформируются в клиническую пользу:

1. **Снижение токсичности:** Минимальное облучение здоровых тканей и критических органов (спинной мозг, сердце, легкие, зрительные нервы) приводит к снижению частоты и тяжести острых и поздних лучевых осложнений (например, снижение риска развития кардиотоксичности при раке молочной железы или нейрокогнитивных нарушений при опухолях головного мозга).
2. **Педиатрическая онкология:** Протоны являются методом выбора для лечения многих детских опухолей. Снижение общей интегральной дозы облучения тела уменьшает риск задержки роста и развития, а также вторичных радиоиндуцированных злокачественных новообразований в будущем.
3. **Повторное облучение:** В случае рецидива опухоли в ранее облученной области, уникальное распределение дозы протонов позволяет провести повторный курс облучения, минимизируя накопленную дозу в уже скомпрометированных критических структурах.

Сравнение Технологий Доставки Дозы

Современная лучевая терапия опирается на широкий спектр технологий доставки дозы, которые существенно различаются по физическим принципам, точности, дозовым характеристикам и клинической эффективности. Оптимальный выбор метода определяет баланс между локальным контролем опухоли и минимизацией токсичности. В условиях растущего онкологического бремени и необходимости персонализированной терапии сравнение доступных технологий особенно актуально. Для достижения высокой точности, оба

метода используют технологии модуляции дозы (см. Таблицу 1). Современная ПТ, в частности, использует Сканирование Карандашным Пучком (PBS).

Таблица 1: Сравнение ключевых технологий ФТ и ПТ

Характеристика	Фотонная Терапия (IMRT/VMAT)	Протонная Терапия (PBS)
Частица	Фотон (Рентгеновский луч)	Протон (Заряженная частица)
Дозовый профиль	Экспоненциальное снижение, ненулевой "хвост" дозы	Пик Брэгга, нулевая доза за мишенью
Метод модуляции	Многолепестковый коллиматор (MLC), вращение гентри	Сканирование карандашным пучком (PBS)
Контроль дозы	Модуляция интенсивности на входе	Модуляция интенсивности и глубины (энергии)
Преимущество	Скорость лечения, широкая доступность, низкая стоимость	Сохранение критических органов, снижение интегральной дозы

Педиатрическая Онкология

ПТ является стандартом лечения для большинства педиатрических опухолей. Дозиметрический выигрыш приводит к значительному снижению дозы на развивающиеся органы (мозг, гипофиз, сердце, почки, щитовидная железа). Это критически важно для уменьшения риска:

- Когнитивных нарушений.
- Нарушений роста и эндокринной дисфункции.
- Развития вторичных злокачественных опухолей в течение жизни.

Опухоли в непосредственной близости от критических структур

ПТ позволяет спасти органы, которые ФТ облучает слишком сильно.

- **Опухоли основания черепа и позвоночника:** Возможность щадить ствол мозга и спинной мозг, что позволяет безопасно эскалировать дозу на опухоль.
- **Рак легкого и пищевода:** Значительное снижение дозы на **сердце** (снижение риска лучевой болезни сердца) и **легкое** (снижение риска пневмонита). Исследования показывают, что уменьшение средней дозы на сердце коррелирует с улучшением общей выживаемости.

Повторное Облучение (Ре-облучение)

Пациенты, которым требуется лечение в области, которая уже получала максимальную дозу облучения в прошлом, являются идеальными кандидатами для ПТ. Нулевая "выходная" доза позволяет избежать повторного облучения ранее поврежденных тканей, что делает повторное лечение возможным и безопасным.

Ограничения и Перспективы

Несмотря на дозиметрическое превосходство, широкое внедрение ПТ ограничено:

1. **Высокая Стоимость и Сложность:** Стоимость строительства и эксплуатации протонных центров (из-за необходимости использования циклотронов/синхротронов) значительно выше, чем для стандартных линейных ускорителей.

2. **Неопределенность Диапазона (Range Uncertainty):** Точное расположение Пика Брэгга очень чувствительно к изменениям плотности тканей (например, из-за наполненности кишечника или движения легких), что требует сложной верификации.

3. **Недостаток Рандомизированных Исследований:** Во многих случаях для распространенных опухолей отсутствуют убедительные данные из крупных рандомизированных клинических испытаний, которые бы однозначно показали превосходство ПТ над высокотехнологичной ФТ (VMAT) в плане общей выживаемости.

Перспективы связаны с развитием **МРТ-контролируемой протонной терапии (MR-Proton)**, которая позволит проводить лечение в режиме реального времени и обеспечит более точную адаптацию плана.

1. Предоставление практических критериев для выбора радиотерапевтической технологии в условиях ограниченных ресурсов.
2. Поддержка мультидисциплинарных консилиумов в принятии решения: документ служит ориентиром для соотношения клинических выгод и затрат.
3. Обеспечение базиса для формирования локальных протоколов/руководств, особенно в центрах, рассматривающих инвестиции в протонную инфраструктуру.
4. Стимулирование дальнейших клинических исследований и RCT в областях, где **Показатели токсичности и качества жизни** — ранние и поздние радиационные осложнения (сердечно-сосудистые, лёгочные, нейрокогнитивные, эндокринные), а также риск вторичных злокачественных опухолей — ключевые клинические исходы, которые напрямую коррелируют с интегральной дозой и распределением дозы.
1. **Педиатрия** — снижение интегральной дозы жизненно важно для роста, нейрокогнитивного развития и снижения риска радиационно-индуцированных неоплазий.
2. **Опухоли основания черепа и позвоночника** — высокая клиническая значимость органосбережения для функциональных исходов.
3. **Повторное облучение** — частая клиническая дилемма, в которой РТ может дать дозиметрическое решение, позволяющее провести лечение с приемлемым риском.

Заключение

Протонная терапия представляет собой революционную технологию в лучевой онкологии. Благодаря уникальному дозиметрическому профилю, она обеспечивает беспрецедентную защиту критических органов и снижение интегральной дозы. Клинический выбор должен основываться на тщательной оценке дозиметрического выигрыша, потенциального снижения токсичности и анализа долгосрочных данных. Протоны являются

незаменимым инструментом для педиатрии и опухолей вблизи жизненно важных структур, а в будущем, по мере накопления данных, их роль в лечении распространенных опухолей будет только возрастать.

Список Литературы

1. J. R. Schlessinger, L. E. W. Schlessinger, R. J. J. Schlessinger, The Physical Basis of Proton Therapy. J. Oncol. Sci., 2020.
2. Usarov M.Sh., Ruziyev U.Sh. (2025) DILATATSION KARDIOMIOPATIIYADA O'NG VA CHAP QORINCHA FUNKSIYASINI BAHOLASHDA ULTRATOVUSH TEKSHIRUVINING ZAMONAVIY MEZONLARI. Healthway, 1(4), 252-260. <https://doi.org/10.64411/37nrsb41>
3. Yakubov D.J., Norqobilov S.S. (2025) EKTOTIK UROTSELE: UTIDA KO'RINISHI, DIAGNOSTIK AHAMIYATI VA KLINIK XUSUSIYATLARI. Healthway, 1(4), 261-270. <https://doi.org/10.64411/h5rn1c06>
4. Usarov M.Sh., Akhrorov A.U. (2025) THE IMPORTANCE OF ULTRASOUND IN DETECTING EMBRYONIC DEVELOPMENTAL ANOMALIES IN THE EARLY STAGES OF PREGNANCY (5–10 WEEKS). Healthway, 1(4), 271-278. <https://doi.org/10.64411/0z80x971>
5. Umarov F.U., Sadinov X.O'. (2025) TRAVMATIK SHAROITLARDA BO'YIN UMURTQALARI SHIKASTLANISHINING RENTGEN DIAGNOSTIKASI. Healthway, 1(5), 16-22 <https://doi.org/10.64411/yp8nd902>
6. Давлатов С.С., Хамидов О.А., Умаркулов З.З. (2025) ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОИНВАЗИВНЫХ ЭНДОВИДЕОХИРУРГИЧЕСКИХ И НАВИГАЦИОННО-ПУНКЦИОННЫХ МЕТОДОВ В ХИРУРГИИ ЭХИНОКОККОЗА ПЕЧЕНИ И ЕГО ОСЛОЖНЁННЫХ ФОРМ Healthway, 1(5), 47-60 <https://doi.org/10.64411/efzym238>
7. E. H. van der Veldt, et al. Cost-effectiveness of proton therapy for cancer: a review and future directions. Cancer Treat Rev, 2020.
8. Proton Therapy: A Primer for the Clinician. Am Soc Clin Oncol Educ Book, 2018.
9. Davranov I.I., Zohidov Sh.L. (2025) O'PKA EMBOLIYASINI ERTA ANIQLASHDA KT-ANGIOGRAFIYANING DIAGNOSTIK SAMARADORLIGI. Healthway, 1(4), 102-110. <https://doi.org/10.64411/26cwj885>
10. Usarov M.Sh., Xolmurodov Sh.F. (2025) YURAK YETISHMOVCHILIGI DARAAJASINI BAHOLASHDA ZAMONAVIY EXOKARDIYOGRAFIYANING DIAGNOSTIK IMKONIYATLARI. Healthway, 1(4), 111-119. <https://doi.org/10.64411/rhc0a594>
11. Juraev K.D., Toirov D.X. (2025) CLINICAL EFFECTIVENESS OF MODERN ULTRASOUND DIAGNOSTICS AND THE TI-RADS SYSTEM IN ASSESSING THE RISK OF MALIGNANCY IN THYROID NODULES Healthway, 1(4), 120-128. <https://doi.org/10.64411/d5v8sh28>
12. Жураев К.Д., Юлдашев У.А. (2025) ДОЗИМЕТРИЯ В РАДИОЛОГИИ: МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ЛУЧЕВОЙ НАГРУЗКИ НА ПАЦИЕНТА И ПЕРСОНАЛ (ALARA-ПРИНЦИП). Healthway, 1(4), 137-145. <https://doi.org/10.64411/sp1kcv57>

13. Jurayev K.D., Ardayev A.A. (2025) MRT orqali miya o'smalarini bosqichma-bosqich diagnostika qilish. Healthway, 1(4), 146-154. <https://doi.org/10.64411/rc15jb31>
14. Proton vs. photon chemoradiotherapy for esophageal cancer: a systematic review and meta-analysis. J Thorac Dis, 2022.
15. Умаров Ф.У., Усмонова М.Ш. (2025). Современные подходы к снижению лучевой нагрузки при кт- исследованиях: алгоритмы оптимизации дозы. healthway, 1(3), 93-100. <https://doi.org/10.64411/tkd50871>
16. Atayeva S.X., Bafoyeva M.M. (2025). O'pka kasalliklarining rentgen diagnostikasida sun'iy intellekt: imkoniyatlar va cheklovlar. healthway, 1(3), 101-110. <https://doi.org/10.64411/06msbe93>
17. Якубов Д.Дж., Муминова Р.Р. (2025). Рентгенологические признаки артритов различной этиологии: пути оптимизации дифференциальной диагностики. healthway, 1(2), 251-261. <https://doi.org/10.64411/wz38wt76>
18. Хамидов О.А., Суннатова М.О. (2025). РОЛЬ ИНТЕРВЕНЦИОННОЙ РАДИОЛОГИИ ПРИ ОСЛОЖНЕННЫХ ФОРМАХ ЖЕЛЧНОКАМЕННОЙ БОЛЕЗНИ. Healthway, 1(2), 52-62. <https://doi.org/10.64411/v72fqk09>
19. Умаров Ф.У., Вохидова Ф.Ф. (2025). СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ ЛУЧЕВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ КТ- ИССЛЕДОВАНИЯХ: АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ДОЗЫ. Healthway, 1(3), 4-14. <https://doi.org/10.64411/hp7gwg71>
20. Yakubov D.J., Shukurova S.A. (2025). THE ROLE OF ULTRASOUND IN EARLY DETECTION OF THYROID PATHOLOGY: MODERN CRITERIA AND CLASSIFICATIONS (TIRADS 2024). Healthway, 1(3), 15-24. <https://doi.org/10.64411/d5qc3066>
21. Atayeva S.X., Jurakulova S.T. (2025). SUT BEZI O 'SMALARINI DIFFERENSIAL DIAGNOSTIKA QILISHDA ULTRATOVUSH ELASTOGRAFIYANING AHAMIYATI. Healthway, 1(3), 25-33. <https://doi.org/10.64411/c5rfmm70>
22. Yakubov D.J., Turobov B.U., Berdiqulov A.R. (2025) OSTEOPOROZ VA SUYAK ZICHLIGINI BAHOLASHDA RAQAMLI RENTGENOGRAFIYA: YANGI INDEKSLAR VA ALGORITMLAR. Healthway, 1(3), 263-271. <https://doi.org/10.64411/ztc4zs63>
23. Khamidov O.A., Davranov I.I., Raxmonov N.T. (2025) DYNAMIC RADIOGRAPHY FOR FUNCTIONAL ASSESSMENT OF JOINTS AND THE SPINE. Healthway, 1(3), 272-280. <https://doi.org/10.64411/0eh1bq59>
24. Гайбуллаев Ш.О., Нуров З.Ш. (2025) КОНТРАСТ-УСИЛЕННОЕ УЗИ (CEUS) В ОЦЕНКЕ ОПУХОЛЕЙ ПЕЧЕНИ: СРАВНЕНИЕ С КТ И МРТ. Healthway, 1(3), 281-290. <https://doi.org/10.64411/fkka8424>

Muallif bilan bog'lanish uchun e-mail	Author's contact email	Email для связи с автором
usarovmuxriddin0777@gmail.com		