

**Рецензия на проект**  
**«Совершенствование методов, технологий, режимов планирования и проведения**  
**лучевой терапии» на 2023 г.**

В настоящее время для проведения дистанционной радиотерапии онкологических заболеваний разработано большое количество методов. Среди них одним из самых успешных и перспективных является протонная терапия. Метод протонной терапии является наиболее перспективным направлением радиационной онкологии. Эффективность протонной терапии, по сравнению со стандартной лучевой терапией, обусловлена тем, что протоны позволяют формировать прецизионно локализованное выделение дозы излучения в глубоко расположенной опухоли при минимальном облучении здоровых тканей, окружающих опухоль. В мире этим методом пролечено уже около 250 тысяч пациентов.

Для успешного лечения онкологических больных необходимо совершенствовать технологию облучения методом протонной терапии, прежде всего планирование облучения и доставку пучка, сделать более аккуратным определение положения мишени, улучшить возможности формирования необходимого дозного распределения пучка в тканях пациента, а также, максимально увеличить биологическую эффективность воздействия энергии частиц, попавших в объем опухоли. Решению именно этих задач посвящены исследования и разработки, проводимые в рамках темы на протяжении последних лет.

К весьма существенным достижениям в области протонной радиотерапии и радиохирургии можно отнести разработанную и реализованную в ОИЯИ в рамках этих работ методику трехмерной конформной протонной лучевой терапии, при которой максимум формируемого дозного распределения наиболее точно соответствует форме облучаемой мишени. Для лечения больных методом трехмерной конформной протонной терапии в МСЧ №9 ФМБА в г.Дубне в 1999 г. Было создано специальное радиологическое отделение. Это позволило при клинических исследованиях, проведенных на пучках фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, облучать новообразования, расположенные в области головы, шеи и грудной клетки, локализованные вблизи жизненно важных органов, облучение которых нежелательно, или недопустимо. Успешное решение этой задачи удалось благодаря тому, что были учтены все нюансы облучения, разработаны новые устройства - гребенчатые фильтры, позволяющие формировать пучок с расширенным по глубине до требуемой величины пиком Брэгга, фигурные коллиматоры и замедлители (болюсы), позволяющие придать пучку конформность с мишенью по всем трем направлениям.

Для реализации более конформной методики динамического облучения опухоли широким однородным пучком был разработан и изготовлен макет автоматизированного многолепесткового коллиматора протонного пучка. В стадии разработки находится изготовление многолепесткового коллиматора на 33 пары пластин.

Одним из основных и ответственных компонентов методики трехмерной конформной протонной лучевой терапии является система симуляции и планирования облучения. Многие годы в МТК для этих целей использовалась система планирования, разработанная еще в центре протонной терапии в г. Лома-Линда, США, и адаптированная к пучкам фазотрона. Создание такой системы представляет собой довольно сложную задачу, тем не менее специалистам МТК удалось создать свой вариант подобной программы, который прошел соответствующую дозиметрическую верификацию с использованием гетерогенного фантома Алдерсона и радиохромных пленок и показал достаточную для проведения конформной протонной радиотерапии точность расчетов 3-х мерных дозовых полей. В проекте запланированы работы по расширению возможностей системы для моделирования облучения также динамическими методами.

Была создана в том числе система, контролирующая основные параметры протонного пучка непосредственно во время проведения терапевтического облучения пациентов.

Большое практическое значение имеют разработанные методы повышения «гарантии качества» протонной терапии. Трудно переоценить значение разработки и совершенствования детекторов для дозиметрии медицинских протонных пучков, поскольку очевидно, что одним из главных условий достижения желаемого результата в радиотерапии является правильное определение дозы ионизирующего излучения, поглощенного опухолью. Очень важную роль играет также правильное определение относительной биологической эффективности (ОБЭ) протонного пучка, используемого для облучения пациентов, что должно учитываться при планировании лучевой терапии. В данном случае были определены как физическое (микродозиметрическое), так и биологическое значения ОБЭ.

Необходимо подчеркнуть важность радиобиологических исследований, проводимых в рамках проекта. Многие из них представляют большой интерес, как с чисто научной, так и с практической точки зрения. В частности, в последние годы проводились работы, ориентированные на исследование радиационных эффектов в центральной нервной системе — проблемы, которая является актуальной на протяжении последних десятилетий главным образом ввиду нарастающего применением ионизирующих излучений в терапии опухолей мозга и вопросов радиационной защиты космонавтов в длительных космических полетах

за пределами магнитосферы Земли. Без сомнения, работы в этой области должны быть продолжены.

Второе направление - это повышение дозы, выделяемой в опухолевом объеме при проведении радиотерапии за счет насыщения ее клеток наночастицами тяжелых металлов, таких как  $^{53}\text{I}$ ,  $^{64}\text{Gd}$ ,  $^{78}\text{Pt}$ ,  $^{79}\text{Au}$  и др. Поражение клеток опухоли формируется как за счет первичного, так и за счет вторичного короткопробежного излучения, возникающего в результате взаимодействия налетающих частиц с ядрами тяжелых элементов, сконцентрированных в опухолевых клетках. Такое индуцированное излучение можно использовать для повышения целевой дозы в ходе лучевой терапии злокачественных опухолей без увеличения нецелевой дозы, выделяемой в здоровых тканях.

Наконец, третье направление исследований – это изучение радиобиологических особенностей взаимодействия радиации с высокой мощностью дозы с нормальными и канцерогенными клетками, так называемая, флэш-терапия. И хотя эффект щажения здоровых тканей при таком методе облучения был открыт достаточно давно, только в последние годы к нему стали все больше относиться как к фактору, способному существенно повысить эффективность современной как конвенциональной, так и протонной терапии. Сотрудниками МТК для этих исследований был сформирован специальный пучок протонов энергией 660 МэВ с однородным в диаметре 47 мм сечением и мощностью дозы около 70 Гр/сек, что позволило проводить эксперименты не только с клеточными культурами, но и с лабораторными мышами.

Данные исследования представляются особо важными благодаря тому, что в настоящее время в ОИЯИ ведутся работы по созданию инновационного центра на базе разрабатываемого сверхпроводящего ускорителя MSC-230. Одним из направлений исследований Центра будет разработка новых методов протонной терапии, в том числе и флэш-терапии, так как предполагается, что максимальный ток пучка на выходе из ускорителя будет порядка 10 мкА, а этого вполне хватает для решения данной задачи.

Считаю, что принятое коллективом исполнителей проекта решение о продолжении всех вышеперечисленных исследований еще на 1 год является правильным. Это позволит продолжить проведение статистического анализа результатов облучения пациентов, прошедших курс протонной терапии в МТК. Очень важными для развития возможностей протонной радиотерапии являются предполагаемые разработки управляемой от компьютера аппаратуры для проведения динамического облучения протонным пучком глубоко залегающих новообразований, включая разработку управляемых от компьютера замедлителя переменной толщины и полномасштабного многолепесткового коллиматора, а также приборов диагностики и дозиметрии пучка в режиме флэш-терапии. Следует

отметить, что разрабатываемое оборудование можно будет с успехом использовать на новом ускорителе MSC-230.

Рецензент:

Главный инженер установки «Ускорительный комплекс НИКА»

доктор физ.-мат. наук, профессор



Е.М. Сыресин

14.04.2022