

## ЦЕНТР ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ НА БАЗЕ ФАЗОТРОНА ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г.В. Мицын

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

Представлена история развития и текущее состояние дел в медико-техническом комплексе протонной терапии на базе ускорителя Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Подробно рассматриваются основные этапы подготовки и проведения облучения по реализованной методике объемной конформной протонной терапии.

Ключевые слова: *протонная терапия, фазотрон, ОИЯИ*

### Этапы развития

В Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) ОИЯИ программа по развитию адронной терапии на пучках синхроциклотрона была начата еще в 1967 г. по инициативе акад. Венедикта Петровича Желепова. На первом этапе исследований на протонном пучке было облучено 84 пациента, после чего ускоритель был остановлен для модернизации. В это же время было начато строительство многокабинного медико-технического комплекса (МТК) для проведения адронной терапии онкологических больных.

После реконструкции ускорителя ЛЯП в сильноточный фазотрон сеансы по лечению онкологических больных были возобновлены. С 1987 по 1996 г. были пролечены 40 пациентов, в основном по поводу рака шейки матки. Затем в исследованиях наступил длительный перерыв, обусловленный рядом причин, основной из которых является общее ухудшение экономической ситуации в России.

Новый виток развития настоящая работа получила в декабре 1999 г., когда усилиями все того же В.П. Желепова в Дубне было открыто специализированное радиологи-

ческое отделение на 20 коек. С 2000 г. в МТК проводятся регулярные сеансы по лечению больных с мишенями, расположенными в области головы, шеи и др. Так, с 2000 по ноябрь 2015 г. на протонном пучке курс лучевой терапии прошли около 1118 пациентов.

Была реализована и применена техника трехмерного конформного облучения глубоко залегающих опухолей протонным пучком, когда максимум дозного распределения наилучшим образом совпадает с формой мишени. Тем самым достигается максимальное щажение нормальных тканей и органов, окружающих опухоль.

### Медико-технический комплекс

Ускоритель Лаборатории ядерных проблем, фазотрон, ускоряет протоны до фиксированной энергии 660 МэВ с выходным током около 1 мкА. Выведенный из ускорителя пучок протонов с помощью регулируемого из пультной замедлителя подтормаживается до нужной энергии и транспортируется в одно из процедурных помещений. Комплекс включает 6 процедурных кабин.

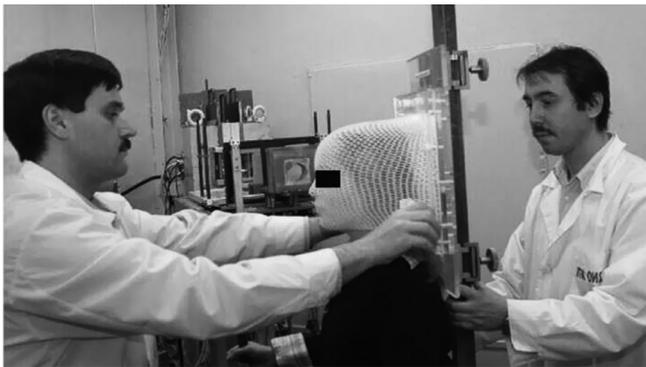


Рис. 1. Внешний вид первой процедурной кабины

Кабина 1 является наиболее универсальной и позволяет проводить протонное облучение мишеней, расположенных в области головы-шеи и в других частях тела пациента. Кабина 2 предназначена для протонной терапии онкогинекологических пациентов. В кабине 3 можно облучать малые внутричерепные мишени протонным пучком 660 МэВ методом “напролет” (аналог кабины, работающей в ПИЯФ). В кабину 4 выведен пучок отрицательных пи-мезонов с перестраиваемой энергией 30–80 МэВ. В кабине 5 можно проводить как протонную терапию, так и терапию высокоэнергетическим пучком нейтронов больших радиорезистентных опухолей. В кабине 6 установлен стандартный гамма-аппарат РОКУС-М с источником  $^{60}\text{Co}$ , используемый как резервный источник излучения, а также для проведения комбинированного лечения, когда часть необходимой дозы набирается от гамма-излучения, а далее проводится протонный буст.

Из-за ограниченного финансирования наших работ и времени работы на ускорителе было решено сконцентрировать основные усилия на развитии первой процедурной кабины, как наиболее универсальной с точки зрения облучения широкого круга локализаций (рис. 1). Облучение пациентов здесь можно проводить как в положении сидя, так и в положении лежа горизонтальным широким фиксированным протонным пучком с энергией от 150 до 230 МэВ. Эта кабина была модернизирована нами в соответствии с требованиями прецизионной протонной терапии.

## Основные этапы объемной конформной протонной лучевой терапии

К такому можно отнести следующие пункты:

- ✓ Иммобилизация области, подлежащей облучению;
- ✓ Проведение рентгеновского и магнитно-резонансного томографических исследований и введение срезов в программу планирования;
- ✓ Трехмерное компьютерное планирование облучения;
- ✓ Изготовление индивидуальных устройств формирования пучка – фигурных коллиматоров и компенсирующих болусов;
- ✓ Реализация и верификация плана облучения.

Подготовка к предлучевой диагностике начинается с изготовления индивидуального устройства, иммобилизирующего облучаемую область, – маски из термопластической перфорированной пластмассы.

Диагностические исследования (рентгеновская компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, ангиография) проводятся уже в маске. Затем эти томограммы специальным образом обрабатываются и вводятся в трехмерную компьютерную систему планирования облучения.

Конформная лучевая терапия невозможна без компьютерного моделирования облучения. В результате сотрудничества с первым в мире госпитальным центром протонной терапии в г. Лома-Линда, разработанная в этом центре трехмерная компьютерная система планирования протонного облучения TRN была адаптирована к оборудованию и протонным пучкам фазотрона ЛЯП ОИЯИ. После серии дозиметрических экспериментов, верифицирующих алгоритм расчета дозы, система используется в клинической практике. Однако эта программа не поддается каким-либо модернизациям, что не позволяет использовать ее с другими развиваемыми нами методиками облучения. В частности, на протяжении последних лет нами разрабатывается программно-аппаратный комплекс для реализации методики динамического облучения глубоко залегающих опухолей широким протонным пучком, что позволит повысить степень конформности проводимой лучевой терапии. Так, уже собран и опробован

ван динамический замедлитель протонного пучка, работающий как в ручном режиме, так и по командам от компьютера. Также разработан и изготовлен прототип динамического многолепесткового коллиматора на 4 пары пластин. После его тестирования и отработки специализированного программного обеспечения будет начато создание полномасштабной версии устройства на 33 пары пластин с высотой каждой пластины 3 мм. К настоящему времени в МТК в основном завершена разработка варианта собственной программы планирования конформной протонной терапии, который уже прошел дозиметрическую верификацию с использованием гетерогенного фантома Алдерсона и радиохромных пленок, и в настоящее время проводится его клиническая апробация.

Программа планирования работает следующим образом. Трехмерный массив топометрической информации, полученный при детальной компьютерной томографии, вводится в систему планирования облучения. На каждом аксиальном срезе врач-радиолог очерчивает мишень облучения и критические структуры (например, ствол мозга, зрительный нерв и др.). В результате получается объемный массив топометрической информации. Кроме того, задается количество полей облучения и его направления. По этим данным система планирования генерирует трехмерные модели очерченных структур. С помощью функции “beam’s-eye-view” (вид со стороны пучка) и цифровых реконструированных рентгенограмм черепа для каждого направления облучения определяется и очерчивается протонный пучок сложной формы, который при реальном облучении формируется с помощью индивидуального коллиматора из сплава Вуда (рис. 2а).

Для придания конформности дозного распределения протонного пучка по глубине форме мишени рассчитываются и затем изготавливаются так называемые болусы – сложной формы замедлители, учитывающие гетерогенную структуру тканей и органов пациента, расположенных на пути пучка. Они изготавливаются из специального ювелирного воска на фрезерном станке с ЧПУ (рис. 2б).

При сложении всех одиночных пучков с разных направлений рассчитывается суммарное дозное поле. Сечения трехмерных структур облучаемой области и дозного распределения могут быть визуализированы в трех ортого-

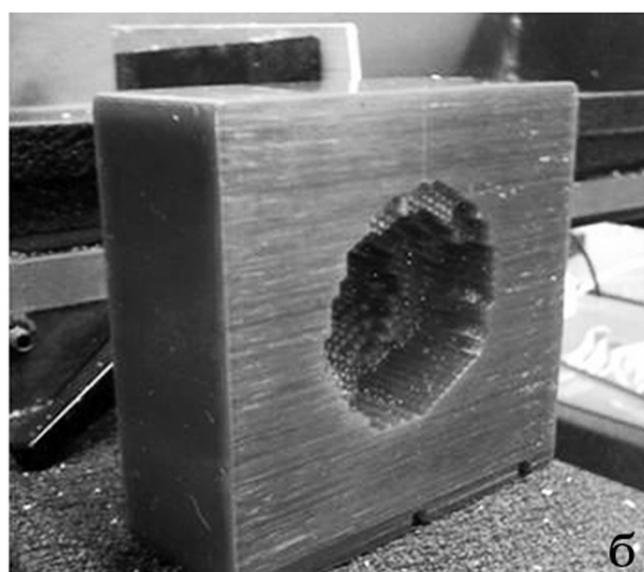
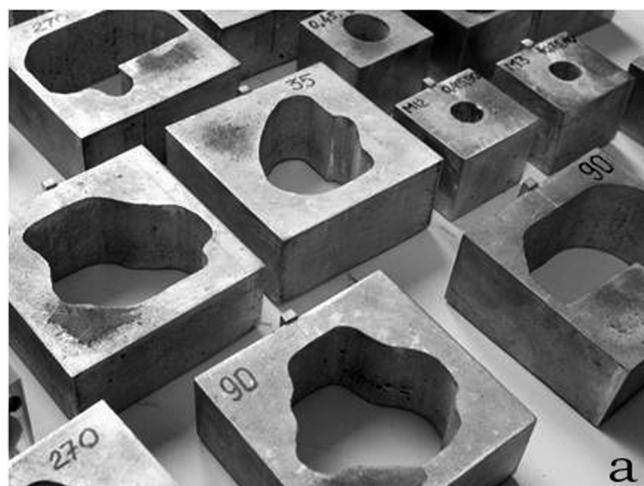


Рис. 2. Индивидуальные коллиматоры из сплава Вуда (а) и болус из ювелирного воска (б)

нальных проекциях: аксиальной, сагиттальной, корональной. Этап подготовки к облучению заканчивается изготовлением в мастерских МТК рассчитанных программой планирования индивидуальных фигурных коллиматоров и болусов.

Само протонное облучение проводится, как правило, фракционированно – ежедневно за исключением выходных дней в течение трех–семи недель (т.н. “ускорительный цикл”).

Каждый день перед началом сеанса облучения в процедурную выводится терапевтический протонный пучок и проводится тщательная его дозиметрия. Измеряются профиль пуч-

ка, его глубинно-дозное распределение, мощность дозы. Затем эти параметры контролируются непосредственно во время облучения пациентов.

Для обеспечения высокой точности наведения протонного пучка на мишень для каждого направления облучения непосредственно перед облучением изготавливается контрольный рентгеновский снимок головы пациента (или другой облучаемой части тела). Кроме того рентгеновский цифровой экран одновременно экспонируется протонным пучком низкой интенсивности. В результате через 20–30 с на экране монитора компьютера появляется изображение, где отчетливо

видно положение протонного пучка относительно неподвижных анатомических структур черепа. Если это положение не совпадает с точностью 1 мм с тем, которое было рассчитано программой планирования (так называемые цифровые реконструированные рентгенограммы), производится коррекция положения кресла с пациентом относительно пучка. Сразу после этого проводится терапевтическое облучение протонным пучком.

Ранние результаты клинически и рентгенологически подтвердили, что разработанная техника облучения обеспечивает точное подведение дозы к планируемому патологическому объему.

#### PROTON BEAM THERAPY CENTER BASED ON PHASOTRON IN DUBNA

G.V. Myzin

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

The history of development and status of medico-technical complex based on the Nuclear Problem Laboratory accelerator in JINR is described. Key steps in preparing and proton beam irradiation with developed methodology are considered.

Key words: *proton beam therapy, phasotron, JINR*

E-mail: [mytsin@nusun.jinr.ru](mailto:mytsin@nusun.jinr.ru)