

ПЕРВИЧНАЯ ПОДГОТОВКА МЕДИЦИНСКИХ ФИЗИКОВ ДЛЯ РАБОТЫ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

*Н.Ф. Карякина, Е.В. Кижяев, А.В. Столбовой,
Е.Л. Разумова, Е.П. Симакина, Е.М. Жмаева*

Российская медицинская академия последипломного образования, Москва

Обсуждается накопленный педагогический опыт первичной подготовки медицинских физиков для работы в радиотерапевтических отделениях медицинских организаций. Отражены основные разделы и темы специальности во всех видах занятий (лекции, семинары, практика). Подчеркивается большая роль обучения клиницистов.

Ключевые слова: *медицинский физик, лучевая терапия, кафедра радиотерапии и радиологии, первичная подготовка*

Кафедра радиотерапии и радиологии Российской медицинской академии последипломного образования (РМАПО) на протяжении длительного времени осуществляет подготовку лучевых терапевтов и радиологов почти из всех регионов России. Кафедра располагает информацией об оснащении и переоснащении радиотерапевтических отделений России. В программе профессиональной переподготовки врачей имеется раздел физики о взаимодействии ионизирующих излучений с веществом, формировании дозовых полей, создании планов облучения, фракционировании доз при облучении и др.

Вполне естественно, что бывшим руководителем кафедры, академиком РАМН А.С. Павловым был поставлен вопрос и о возможной подготовке физиков для радиологических отделений. Профессорско-преподавательским составом кафедры была разработана учебно-методическая программа (лекции, семинары, практические занятия) и с 1975 г. было организовано проведение циклов "Клиническая дозиметрия". Бессменным вдохновителем и куратором этих циклов долгие годы была доцент кафедры, кандидат технических наук Марина Антоновна Фадеева, ученица Александра Натано-

вича Кронгауза, одного из основоположников этой области медицинской физики в Советском Союзе.

Многие медицинские физики, прошедшие первичную подготовку на кафедре, работают в радиологических отделениях и по настоящее время, в дальнейшем повышая свою квалификацию на различных международных (ESTRO, МАГАТЭ) и отечественных школах, в том числе на международных курсах РМАПО и РОНЦ, в организации которых активно участвует Ассоциация медицинских физиков России (АМФР).

До настоящего времени в России наблюдается острая нехватка медицинских физиков. Руководство медучреждений вынуждено привлекать к этой работе инженеров и выпускников ВУЗов без специальной подготовки для работы в этой области. У таких сотрудников есть необходимость получить начальные знания по специальности, которым обычно не уделяется должного внимания на вышеупомянутых школах.

Следует отметить, что наряду с хорошо оснащенными радиологическими отделениями, есть отделения, не переоснащенные к настоящему времени и работающие на аппаратах

Таблица 1

Отечественные компьютерные системы дозиметрического планирования облучения

Название системы	Область применения	Основная характеристика
АМФОРА	Дистанционная ЛТ	3D-конформное планирование с широкими возможностями визуализации
ГАММАПЛАН	Дистанционная ЛТ	2,5D-планирование
RX-PLAN	Дистанционная ЛТ	2D-планирование
RT-PLAN	Дистанционная ЛТ	3D-планирование

ещё советского периода и располагающие лишь 2D- или 2,5D-системами планирования (отечественные системы RXPLAN и ГАММАПЛАН). К сожалению, есть и такие учреждения, где сами врачи (ввиду отсутствия физика и компьютерных систем планирования) пользуются так называемым “ручным планированием” облучения. Справедливости ради следует сказать, что подобных ситуаций становится заметно меньше с каждым годом. Поэтому неоднородность обучающихся требует определённой организации учебного процесса, особенно в части физико-технического раздела для врачей и подготовки медицинских физиков в частности. Только за последние годы (2007–2015 гг.) на циклах “Клиническая дозиметрия” прошли подготовку 150 начинающих или со стажем порядка одного года физиков для радиологических отделений. Ниже представлен методический подход к организации профессиональной подготовки медицинских физиков с небольшим стажем работы.

Клиническая база кафедры (клиника РМАПО) располагает следующим оборудованием для лучевой терапии:

- ✓ Гамма-терапевтические аппараты для дистанционного облучения АГАТ-С и РОКУС-АМ.
- ✓ Линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) SL-75М.
- ✓ Гамма-терапевтический аппарат для внутриволостного облучения с С-дугой и планирующей системой Brahy Vision, позволяющая осуществлять 2D и 3D планирование (Varian Brahy Therapy GammaMedplus 3/24iX).
- ✓ Рентгенотерапевтический аппарат РЕНТГЕН-ТА.
- ✓ Компьютерный рентгеновский томограф для предлучевой подготовки фирмы Philips (Brilliance CT Big Bore Oncology, модель 728243).

- ✓ Отечественные компьютерные системы планирования облучения (СП), представленные в табл. 1.

Дозиметрическое оборудование:

- ✓ Дозиметр DOSE-1 с набором ионизационных камер.
- ✓ Дозиметр KEUTLI с набором ионизационных камер.
- ✓ Водный фантом.
- ✓ Твердотельные фантомы из тканеэквивалентного пластика.

Организация учебного процесса, исходя из возможностей технологического оснащения клиники, позволяет обучающимся приобрести навыки и умения, необходимые для работы по клинической дозиметрии и планированию лучевого лечения. Процесс обучения имеет организационные и методические преимущества: кафедра и клиника располагаются в одном здании, сложившийся профессорско-преподавательский состав обеспечивает высокий методический уровень подготовки слушателей.

Ознакомительные занятия для начинающих физиков с максимально возможным техническим оснащением радиологических отделений обеспечивают сотрудники, совмещающие работу на кафедре с основным местом работы (Институт нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, клиническая больница № 62).

За прошедшие годы программа обучения на цикле “Клиническая дозиметрия” была расширена за счет включения компьютерного планирования облучения, изучения радиобиологических моделей, вопросов толерантности нормальных тканей и др., и цикл подготовки мог бы называться “Медицинская физика в радиотерапии”. Такое название позволило бы выдавать прошедшим обучение соответствующую “медицинский физик в радиотерапии”, тем более, что по приказу МЗ РФ N 915н от 15 ноября 2012 г. в штатах радиологических отделений предусмотрены должности именно медицинских физиков.

Методика профессиональной подготовки медицинских физиков включает: лекции, семинары, практические занятия, контрольное тестирование. Читаются лекции по следующим разделам специальности:

- ✓ Введение в клинику (анатомия и анатомические термины, радиационная онкология, лучевое лечение).
- ✓ Ионизирующие излучения и их взаимодействие с веществом.
- ✓ Количественные и качественные характеристики ионизирующих излучений, применяемых в лучевой терапии.
- ✓ Аппараты для лучевой терапии, дозиметры, фантомы и системы планирования (СП).
- ✓ Дозиметрия пучков ионизирующих излучений. Абсолютная дозиметрия. Протоколы измерений. Калибровка систем планирования.
- ✓ Формирование дозовых полей.
- ✓ Модификация дозовых полей.
- ✓ Основы дозиметрического планирования облучения (топометрия, определение основных объемов облучения и критических объемов, создание планов облучения).
- ✓ Конформное и квазиконформное облучение, гистограммы “доза–объем”.
- ✓ Документирование процесса лучевой терапии.
- ✓ Радиобиологические модели (НСД, ВДФ, ЛКМ) в оценке вероятности осложнений в нормальных тканях и определение изоэффективных режимов фракционирования дозы.

Лекционный материал формируется на основании монографий, посвященных вопросам физики в лучевой терапии, клинической дозиметрии, вопросам дозиметрического и радиобиологического планирования лучевой и радионуклидной терапии, на докладах МКРЕ (ICRU), материалах школ ESTRO и др. Слушатели получают презентации в PowerPoint с большим иллюстративным материалом: таблицы, графики, необходимое количество формул. В конце каждой лекции дается список рекомендуемой литературы.

Многие лекционные темы поддерживаются практическими и семинарскими занятиями по следующим разделам:

1. *Дозиметрия пучков фотонных излучений на рентгенотерапевтических, гамма-терапевтических аппаратах и ЛУЭ.*

В рамках этого занятия происходит знакомство с основными узлами аппаратов, ана-

лизируются паспорта на радиоактивные источники ^{60}Co , ^{192}Ir . Слушатели знакомятся с режимами работы рентгенотерапевтического и гамма-аппаратов и ЛУЭ. Обсуждаются параметры облучения, необходимые в практической деятельности: установка размеров полей и углов ротации, облучение при постоянном РИП или РИЦ, формирующие принадлежности, позиционирование пациента на лечебном столе. Фиксируется внимание на понятиях экспозиционной и поглощенной доз и соответствующей величины мощности этих доз, глубины максимума ионизации, обсуждается роль понятий ОТВ и ОТМ.

В рабочем режиме разбираются все параметры дозиметров (электрометра и ионизационных камер), их чувствительность, необходимость периодической поверки в поверочных лабораториях. Слушатели участвуют в измерениях экспозиционной и поглощенной дозы (по РИЦ и РИП, в водном и пластиковых фантомах). Проводятся абсолютные измерения поглощенной дозы фотонного пучка в воде, что является зоной особой ответственности медицинского физика. При проведении этих занятий мы руководствуемся двумя документами: [1] и [2]. Эти измерения необходимы для калибровки СП. В нашем распоряжении имеются только отечественные системы, среди которых только способ калибровки СП АМФОРА соответствует принятым стандартам калибровки для гамма-излучения ^{60}Co (РОКУС-АМ, Терагам, Терабалт) и фотонных пучков ЛУЭ. Поэтому на примере калибровки этой СП слушатели имеют возможность освоить калибровку тех импортных систем, которые поставляются вместе с тем или иным аппаратом.

Поскольку в некоторых организациях используются СП RXPLAN и ГАММАПЛАН, способы калибровки которых отличаются от калибровки АМФОРЫ и импортных систем, то эти особенности тоже обсуждаются.

Также обсуждаются способы калибровки радиоактивных источников, применяемых в аппаратах для контактной лучевой терапии. Проводится занятие по калибровке источника на аппарате GammaMedplus, одним из доступных способов – в воздухе или в тканеэквивалентном фантоме (при отсутствии колодецевой камеры).

2. *Протоколы измерений доз.*

После проведения измерений (по РИЦ и РИП) в водном фантоме поглощенной дозы фотонного пучка в зависимости от его энергии

(для гамма-аппаратов и ЛУЭ) проходит занятие по составлению соответствующих протоколов измерений. Основное внимание уделяется протоколу [2]. С практической точки зрения, проведение измерений и составление соответствующих протоколов по принятым стандартам позволяет продемонстрировать слушателям и тот факт, что доза в максимуме ионизации, часто обозначаемая как “входная доза” при однополюсном облучении с ^{60}Co , независимо от способа измерения поглощённой дозы по РИЦ или РИП, совпадает с высокой степенью точности.

3. Формирование дозовых полей.

На этих занятиях начинающие физики знакомятся с историей развития методов планирования облучения. Методически целесообразно этот раздел обучения начать с понятия “дозовое поле”. На примере “Атласов дозовых полей”, которыми в своё время комплектовались гамма-аппараты с источником с ^{60}Co , обучающиеся знакомятся с большим разнообразием карт изодоз, полученных прямыми измерениями. Обсуждаются понятия длины и ширины поля, процентной глубинной дозы ($D_{\%}$), карты $D_{\%}$, облучение при постоянном РИП и РИЦ и, соответственно, способов нормировки дозового поля по РИП и РИЦ. Анализируется разнообразие дозовых карт однополюсного и многополюсного облучения по РИП и по РИЦ и подвижного облучения в зависимости от ширины и длины поля, углов ротации. На простых примерах однополюсного облучения и облучения двумя встречными полями даётся простой расчёт времени сеанса облучения при заданной разовой дозе в центре условной мишени и мощности дозы при определённых параметрах облучения.

Для отдельных слушателей, у которых нет СП, проводятся практические занятия по основам “ручного планирования” однополюсного и многополюсного облучения, подвижного облучения с применением карт $D_{\%}$ из Атласов, с расчётом продолжительности сеанса облучения в зависимости от разовой дозы в мишени, параметров облучения и мощности дозы при определённых параметрах облучения.

Накопленный за прошедшие годы методический опыт “ручного планирования” облучения по картам изодоз был использован для разработки учебного пособия [3]. Практическое выполнение упражнений по формированию дозовых полей проводится по этому учеб-

ному пособию на компьютерных СП. Упражнения позволяют на тканеэквивалентном фантоме при однополюсном облучении оценивать распределение D , и $D_{\%}$ в зависимости от глубины, энергии излучения, РИП, размера поля, их изменение при применении формирующих устройств (клинья, блоки). Кроме того есть упражнения по формированию многополюсного и подвижного облучения, облучения с включением неоднородности (костной и лёгочной) в тканеэквивалентном фантоме. На этих занятиях слушатели изучают возможности тканеэквивалентного фантома в СП, как вспомогательной опции, для решения некоторых проблем, возникающих в работе начинающего физика. При отсутствии этой опции в СП рекомендуется провести КТ-сканирование водного или пластикового фантома и ввести в систему, например, под именем PHANTOM.

Заключительный этап практических занятий – формирование облучения различными способами произвольно назначенной мишени в тканеэквивалентном фантоме с получением гистограмм “доза–объём” и обоснованием оптимального плана.

4. Основы планирования облучения.

Успешное лучевое лечение обеспечивается согласованием всех этапов процесса: диагностики, топометрии, планирования и реализации облучения, поэтому существенным является контакт врачей и физиков на последних трёх этапах этого процесса. Естественно, что в обучении физиков активное участие принимают преподаватели-клиницисты. Они проводят семинары, на которых обсуждают роль и возможности радиотерапии в лечении злокачественных новообразований. Рассматриваются возможности и варианты облучения в зависимости от локализации, распространённости процесса на различных этапах лучевого лечения. После занятий по рентгено-топометрической подготовке больного на КТ (или по рентгеновским снимкам) проводятся занятия по созданию реальных 3D планов облучения с использованием КТ-срезов и 2D-планов по центральному срезу с дигитайзера различных опухолей.

Практические занятия по планированию строятся по двум направлениям:

- ✓ обсуждаются основные принципы и методики рентгеновской и КТ-топометрии;
- ✓ создаются планы облучения больших с использованием полученных на практических занятиях рентгеновских и КТ-изображений и архивного материала клиники.

Практические и семинарские занятия этого раздела полезны для ежедневной работы физика. Они проводятся совместно с преподавателями-клиницистами. Т.к. определение объёмов облучения – это функция врача, на занятиях обсуждаются практические рекомендации по оконтуриванию объёмов: GTV, CTV, PTV, PRV, необходимых отступов от этих объёмов в зависимости от локализации распространённости злокачественного процесса и различных этапов лучевого лечения. Физики осваивают методики облучения наиболее распространённых локализаций: молочной железы, органов малого таза, грудной клетки, головы и шеи. Слушателям предоставляется возможность самостоятельного планирования. Создаётся два-три приемлемых плана облучения некоторых локализаций опухолей с распечаткой дозового поля, протокола укладки, ГДО. На этом этапе физики должны обращать особое внимание среди основных параметров облучения на точку нормировки ($D_{90}=100\%$), её смысл, положение, значение дозы в этой точке, её влияние на дозовое распределение, продолжительность облучения, появление “горячих” зон и зон малых доз в органах риска.

Занятия по планированию контактной (внутриполостной) лучевой терапии начинаются также с ознакомления с типичными распределениями дозы в зависимости от типа интрастата и количества позиций источников в соответствующих каналах и требований нормировки. На практических занятиях обучающиеся участвуют в реальных сеансах внутриполостного облучения: топометрия с помощью С-дуги или КТ с последующим планированием (2D или 3D) на системе Brahy Vision.

Практические занятия по планированию включают обсуждение созданных планов с клиницистами: обсуждаются рекомендуемые разовые и суммарные дозы, дозы в критических органах, режимы фракционирования. Обращается внимание на существующие стандарты режимов фракционирования доз в зависимости от локализации, морфологии, распространённости (стадии) злокачественного процесса. Обсуждаются методики и режимы фракционирования доз на различных этапах лечения опухолей конкретных локализаций. Выбирается оптимальный, по мнению врачей, план облучения, обсуждается документирование и представление отчёта [4, 5]. На заключительном этапе слушатели участвуют в реализации плана облучения с позиционированием пациента

на лечебном столе в соответствии с созданным протоколом сеанса облучения.

5. Радиобиологические модели и вероятность осложнений в нормальных тканях.

Для закрепления лекционного материала по теме “радиобиологические модели” проводятся практические занятия, где курсанты решают задачи по расчёту факторов ВДФ для типичных клинических ситуаций, когда можно оценить вероятность осложнений в нормальных тканях и определить изоэффективные режимы фракционирования дозы для дистанционного, внутрисполостного и сочетанного облучения.

На основе модели ЛКМ (LQM) в её модификации ЛКЕД₂ (EQD₂) анализируется понятие биологически эквивалентной дозы и её определение по физической дозе с привлечением параметров модели (α/β), характеризующих определённый тип ткани. Рассматриваются возможности этой модели для определения изоэффективных режимов для достижения эффекта как по контролю опухоли, так и по достижению приемлемого уровня ранних и поздних реакций нормальной ткани.

6. Контроль полученных знаний.

Как на этапе чтения лекций, так и после практических занятий осуществляется контроль полученных знаний. По всем разделам прочитанных лекций создана тестовая компьютерная программа, включающая вопросы по четырём крупным разделам:

- ✓ Количественные и качественные характеристики ионизирующих излучений.
- ✓ Основные понятия и количественные величины в клинической дозиметрии.
- ✓ Аппараты для лучевой терапии.
- ✓ Формирование и модификация дозовых полей.

После самостоятельного создания плана облучения курсант обосновывает выбор метода и параметров облучения, положение точки нормировки и дозы в ней, по дозовому распределению и гистограммам “доза-объём” обосновывает заданную дозу в PTV и дозу в критических органах в соответствии с толерантностью ткани в зависимости от её облучённого объёма, подробно разбирает протокол сеанса облучения.

После практических занятий по ВДФ проводится контрольная работа. Для самостоятельного решения курсантам предоставляются клинические примеры, требующие оценок фак-

торов ВДФ. Преподаватель вместе с курсантами разбирает типичные ошибки.

На заключительном занятии подводятся итоги обучения с обсуждением особо важных понятий, процедур измерений и работ, которые обязательны для начинающего физика радиологического отделения. Обсуждается список литературы, обязательный для самостоятельной работы. Кроме того, слушателям предоставляется возможность записать на флеш-память или на CD-диск папку "Учебная литература", содержащую полезные таблицы, методические рекомендации, разработанные на кафедре, некоторые книги в электронном виде и др. На этом занятии слушатели делятся своими впечатлениями об учёбе. Они особо отмечают полезность и значимость семинаров и практических занятий с клиницистами.

Наш опыт обучения начинающего медицинского физика показал, что есть необходимость дать не только практические физикотехнические основы специальности, но и воспитать в нём необходимость быть причастным к клиническим проблемам. Для этого на кафедре читаются лекции, знакомящие физика с медицинской терминологией, главными этапами работы радиационного онколога, рассказывается о психологической стороне общения с пациентами и их родственниками. Обращается особое внимание на соблюдение разумного баланса между борьбой за жизнь и недопустимостью чрезмерного вреда здоровью больного собственно лучевым лечением. Приступая к работе в больнице, физик не даёт клятву Гиппократу, не принимает присягу врача, но он должен осознавать, что принимает непосредственное участие в их соблюдении, являясь членом медицинского коллектива. Только во врачебном окружении, наблюдая за лечебным процес-

сом, физик может увидеть разницу между статичностью созданного им плана облучения и динамичностью процесса лучевого лечения.

Выражаем искреннюю признательность коллегам: Г.Е. Горлачёву, В.А. Климанову, Л.Я. Клепперу, В.Г. Сахаровской, В.С. Хорошкову, О.С. Андрюшину, И.Н. Бриккеру, С.А. Князеву, которые любезно соглашались читать лекции и проводить консультации по разным вопросам слушателям-физикам.

Список литературы

1. РД-50-691-89. Поглощенные дозы фотонного (1–50 МэВ) и электронного (5–50 МэВ) излучений в лучевой терапии. Издательство стандартов. – М. 1990.
2. МАГАТЭ. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. Серия технических докладов № 398. МАГАТЭ/ВОЗ. Вена. 2004.
3. Формирование дозовых полей фотонного излучения при дистанционной лучевой терапии. Учебное пособие, разработанное на кафедре радиотерапии и радиологии РМАПО.
4. ICRU Report № 62. Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy (Supplement to ICRU Report 50) // ICRU, 1999. Рус. пер. МКРЕ 50/62. Назначение, протоколирование и отчетность по фотонной терапии // Мед. физика. 1998. № 5. С. 28–32.
5. ICRU Report № 83. Prescribing, Recording, and Reporting Intensity-Modulated Photon-Beam Therapy (IMRT). ICRU. 2010.

BASIC TRAINING OF MEDICAL PHYSICISTS FOR RADIOTHERAPY

N.F. Karyakina, E.V. Kizhaev, A.V. Stolbovoy, E.L. Rasumova, E.P. Simakina, E.M. Zhmaeva
Russian Medical Academy of Postgraduate education (RMAPO)

The article is devoted to pedagogical experience in initial training of medical physicists for radiation oncology and main theoretical subjects and practical educations of considering speciality. Publication includes major aspects of medical physicists and physician collaboration .

Key words: *medical physics, radiotherapy, radiology departament, initial training*

E-mail: radiology5@yandex.ru