

Основы радиационной безопасности в медицине.

Сообщение 3.

Лучевая терапия: дистанционное и контактное облучение закрытыми источниками ионизирующих излучений

Б.Я. Наркевич

*ГУ Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина РАМН, Москва
Институт медицинской физики и инженерии, Москва*

Проектировочное и организационное обеспечение радиационной безопасности (РБ) при лучевой терапии. Проектировочное решение каждого радиологического корпуса и организация всех технологических процессов лечения и диагностики, связанных с использованием источников ионизирующих излучений, должны не только соответствовать назначению, характеру и количеству радиологических процедур, но и обеспечивать выполнение всех необходимых требований по обеспечению радиационной безопасности.

Поэтому планировка помещений радиологического корпуса и организация радиационно-технологических процессов в этих помещениях должны отвечать следующим требованиям:

– адекватный медицинский менеджмент пациентов, включающий удобные вход и выход из радиологического корпуса, удобную транспортировку лежачих больных, непродолжительное ожидание своей очереди на радиологические процедуры, отсутствие дискомфорта при их проведении, психологическое обеспечение радиологических процедур и т.д.;

– гарантия качества всех радиационно-технологических операций, выполняемых в данном радиологическом подразделении;

– адекватная радиационная защита пациентов, персонала и посетителей радиологического подразделения;

– пространственная, временная и функциональная интеграция в другие медицинские процедуры и технологии, выполняемые в остальных структурных подразделениях данной клиники;

– обеспечение оптимального функционального пространства и необходимого оснащения для штатной работы персонала и ликвидации нештатных ситуаций (радиационных аварий).

Следует различать три группы радиационно-терапевтических технологий: 1) дистанционное облучение; 2) контактное облучение с низкой мощностью дозы; 3) контактное облучение с высокой мощностью дозы. В зависимости от вида конкретной технологии требования к помещениям и к организации процессов облучения существенно различаются.

Дистанционное облучение. Для проведения дистанционного облучения больных пучками гамма-квантов, тормозного излучения и быстрых электронов должно быть запланировано наличие следующих функциональных помещений:

1. Помещения для ожидания больными своей очереди на облучение и на остальные технологические процедуры лучевой терапии. Они должны быть изолированы от других помещений клиники аналогичного назначения, где пациенты ожидают своей очереди на проведение диагностических, лечебных и других

процедур, не относящихся к лучевой терапии. Площадь помещения для ожидания на облучение рассчитывается исходя из нормы 12 пациентов на один радиационно-терапевтический аппарат, а для больных, ожидающих своей очереди в кабинет врача-радиолога (радиационного онколога) – из расчета 8 пациентов на одного врача. Площадь проектируемых помещений для ожидания должна обеспечивать также размещение и свободный провоз в каньон аппарата каталок с лежащими больными.

2. Кабинет для размещения рентгеновского симулятора или компьютерного симулятора-томографа. Его габаритные размеры (площадь и высота) должны обеспечивать беспрепятственное и безопасное для больного и персонала перемещение всех подвижных частей томографа, в том числе и до их крайних положений. Здесь же следует предусмотреть небольшую кладовую для хранения средств иммобилизации и формирующих блоков. Радиационная защита должна рассчитываться на основе действующих нормативных документов Минздрава РФ по радиационной безопасности при использовании рентгенодиагностических аппаратов; данный расчет должен выполняться лицензированной проектной организацией.

3. Кабинет дозиметрического планирования должен быть размещен поблизости от кабинета с симулятором, но они могут не быть смежными, причем оба кабинета должны быть связаны коммуникационными линиями локальной компьютерной сети с целью передачи топометрической информации для дозиметрического планирования. Площадь кабинета должна обеспечивать размещение нескольких рабочих мест (в зависимости от кадрового обеспечения), оборудованных компьютерами, видеомониторами, принтерами, графопостроителями, устройствами ввода графической информации (дигитайзерами) и т.д. При этом рекомендуется для удобства работы дигитайзер и видеомонитор на каждом рабочем месте размещать не в линию, а под прямым углом друг к другу.

4. Кабинет для изготовления средств формирования пучка излучения и индивиду-

альных средств иммобилизации больного. Размеры кабинета должны обеспечивать свободное размещение оборудования для разметки, отливки, резки и монтажа формирующих блоков и индивидуальных средств иммобилизации, а также рабочего стола для их подгонки к конфигурации тела лежащего на столе пациента. Необходимо предусмотреть кладовую для хранения расходуемых материалов и использованных блоков и иммобилизаторов. Система вентиляции должна обеспечивать более высокую кратность воздухообмена по сравнению с остальными кабинетами для удаления газов и аэрозолей, образующихся при изготовлении указанных блоков и средств иммобилизации.

5. Один или несколько кабинетов должны быть выделены для размещения средств модификации радиочувствительности облучаемых патологических тканей и (или) всего организма больного (лазерная терапия, магнитотерапия, локальная и общая гипертермия, газовая гипоксия и т.д.). Кабинеты для гипертермии и магнитотерапии должны быть оборудованы системами эффективного электромагнитного экранирования установок с лежами для размещения пациента в положении лежа, а кабинет для гипоксии – оборудован для приготовления газовых смесей и отдельной кладовой для хранения баллонов с газами и линиями коммуникаций для подачи газовых смесей на ингалятор в каньоне ускорителя.

6. Кабинет для собственно терапевтического облучения, т.е. каньон ускорителя или гамма-терапевтического аппарата с пультовой для размещения системы управления облучением. Размеры каньона (площадь и высота) должны обеспечивать беспрепятственное и безопасное для пациента и персонала перемещение всех подвижных частей аппарата, в том числе и до их крайних положений. Кроме того, размеры каньона должны обеспечивать возможность облучения всего тела пациента, обычно находящегося в положении стоя. Толщины радиационной защиты аналогично кабинету для симулятора должны рассчитываться лицензированной проектной организацией. При этом толщины определяются в за-

висимости от близости расположенных за защитой смежных с каньоном помещений и от времени пребывания в них персонала и посетителей: чем больше их посещаемость, тем дальше это помещение должно быть расположено от каньона или тем толще должна быть защита, и наоборот.

Проход в каньон из помещения для ожидания должен быть удобным как для перемещения ходячих и лежащих больных, так и для перевозки и монтажа оборудования. При невозможности выполнения последнего из этих требований следует предусмотреть наличие в радиационной защите монтажного проема с размерами, которые несколько превышают соответствующие габариты устанавливаемого в каньоне оборудования; после выполнения монтажа проем должен быть заложён защитными блоками. Их совокупность должна обеспечивать такую же кратность ослабления излучения, как и остальная часть стены вне проема.

В каньоне или в непосредственной близости от него должна быть предусмотрена кладовая для хранения постоянно используемых при облучении устройств и оборудования (средства иммобилизации, формирующие блоки, аппаратура и приспособления для контроля качества облучения и т.д.).

Входная дверь в каньон должна отвечать следующим требованиям: а) легкость открывания и закрывания (каньон посещается до 100 раз в сутки, и тяжелую дверь трудно открывать и закрывать многократно, особенно женщинам); б) материал и толщина полотна двери должны обеспечивать непревышение установленных пределов дозы профессионального облучения персонала, находящегося в пульту; в) тем не менее, данное требование должно быть обеспечено, главным образом, конфигурацией защитного лабиринта в каньоне и, в меньшей степени, конструкцией самой двери; г) открывание и закрывание двери желательно выполнять вручную, т.к. электромоторный привод имеет высокую стоимость, работает медленно и характеризуется сравнительно непродолжительным интервалом времени наработки на отказ; д) на двери должен быть хорошо различимый знак радиа-

ционной опасности установленной формы; е) дверь должна свободно открываться изнутри каньона во избежание аварийного облучения лиц из персонала.

На входе в каньон должны быть установлено не менее двух систем блокировки (основная и резервная). Они должны отвечать следующим требованиям: а) они должны выключать пучок излучения ускорителя при открывании входной двери каньона или возвращать радионуклидный источник из радиационной головки гамма-терапевтического аппарата в камеру-хранилище; б) повторное включение пучка должно выполняться только при закрывании двери и активации пусковой кнопки на управляющем пульте; в) они должны быть надежно гарантированы от сбоев и отказов в работе; г) над дверью должен быть установлен световой указатель, горящий красным светом при включенном пучке излучения и зеленым – при выключенном; д) резервная блокировка должна включаться автоматически при отказе основной системы блокировки.

В каньоне должна быть смонтирована кнопка аварийного выключения аппарата, причем удобный доступ к ней персонала должен быть обеспечен без необходимости пересечения первичного пучка излучения при любых положениях радиационной головки аппарата относительно облучаемого пациента.

Кроме того, в каньоне должны быть смонтированы: а) устройства для настенного прикрепления систем лазерной центрации пучка на изоцентр поля облучения; б) устройства видеонаблюдения за больным без «мертвых» зон всего пространства каньона; в) устройства двусторонней аудиосвязи между больным и оператором, проводящим облучение; г) радиационный монитор для регистрации рассеянного излучения с автономным (батарейным или аккумуляторным) источником электропитания, причем показания монитора должны быть ясно различимыми уже при входе в защитный лабиринт; д) устройство плавного регулирования уровня освещенности; е) автономная система аварийного освещения.

Прокладку кабелей и линий других коммуникаций следует выполнять вдоль за-

щитного лабиринта в закрытых коробах. При необходимости их прокладки по каналам, проходящим непосредственно через радиационную защиту, следует предусмотреть такую конфигурацию каналов, которая обеспечивает свободный доступ к коммуникациям при их ремонте и не образует пустот в стенах радиационной защиты на пути прохождения пучка первичного излучения. Входные проемы каналов в стенах радиационной защиты от вторичного (рассеянного) излучения должны быть заложены дополнительными защитными пластинами или блоками.

Размеры пультовой должны обеспечить рациональное размещение пульта управления, устройств телевизионного наблюдения за пациентом, контроля продолжительности облучения, двусторонней аудиосвязи, электронной портальной визуализации и всех остальных систем компьютерного управления процессом облучения. Кроме того, конфигурация и размеры пультовой должны обеспечивать удобный подход и подвоз каталки с больным к входной двери каньона.

Низкодозовое контактное облучение. Все помещения этого блока должны находиться рядом друг с другом, чтобы снизить расстояния транспортировки как больных, так и источников излучения. Должна быть исключена необходимость транспортировки больных с введенными в организм закрытыми источниками излучения. В обязательный набор помещений входят:

1. Кабинет-хранилище для хранения источников и для подготовки их к введению в тело пациента. В нем должен находиться защитный сейф для хранения источников, снабженный надежным замком и схемой размещения источников во внутреннем пространстве сейфа. Стены самого хранилища в дополнительной радиационной защите не нуждаются, т.к. при правильном хранении в сейфе низкодозовых источников обеспечивается необходимый уровень РБ персонала. Необходимо также снабдить входную дверь стальной обшивкой, надежными запорами, замком и охранной сигнализацией с выходом сигнала на центральный пульт охраны медицинского учреждения или отделения МВД. Площадь

помещения должна быть достаточной для обеспечения всех процедур получения источников, их хранения, подготовки к облучению, калибровки и возвращения источников в сейф после завершения терапевтических процедур, а также для их выдержки на распад после истечения срока эксплуатации. Выдержка на распад может также производиться и при перемещении отработавших источников в специальное хранилище радиоактивных отходов с достаточной радиационной защитой.

2. Кабинет-операционная. В нем производится введение эндостатов и аппликаторов в тело больного и осуществляется контроль правильности расположения катетеров, эндостатов и аппликаторов с помощью рентгеноскопического аппарата, установленного здесь же. Аппарат также должен обеспечивать возможность многопроекционной рентгенографии для дозиметрического планирования облучения. Здесь же должно быть размещено оборудование для анестезии и для хранения и стерилизации зондов, катетеров, эндостатов и т.п. Необходимо предусмотреть слив в канализацию для промывки аппликаторов и эндостатов, оборудованный раковиной с защитной сеткой для предотвращения потери источника при промывании.

3. Кабинет дозиметрического планирования должен быть поблизости от операционной, но не обязательно смежным с ней. Его площадь должна быть достаточной для размещения компьютерного оборудования и устройств оцифровки изображений на такое количество рабочих мест, которое необходимо для обеспечения бесперебойной работы блока низкодозового контактного облучения.

4. Палаты для пациентов, куда больные доставляются после введения эндостатов с источниками для достаточно продолжительного контактного облучения, часто называют «активными». Желательно, чтобы они были одноместными. Если палаты проектируются из расчета на два и более мест, то в них в непосредственной близости от каждой кровати должны быть установлены радиационно-защитные барьеры. Их конфигурация, материал и толщина должны в максимально возможной степени обеспечивать снижение об-

лучения каждого больного от остальных пациентов в той же палате. Расчет барьеров и защитных стен «активных» палат должен выполняться лицензированной проектной организацией с участием медицинского физика учреждения-заказчика. В палатах должно быть установлено все необходимое оборудование для надежной и безопасной эксплуатации использованных для контактного облучения источников, в том числе контейнер для их аварийного удаления, устройство для подачи и регулировки поступления сжатого воздуха, радиационный монитор с устройством бесперебойного электропитания, блокировка для предотвращения несанкционированного доступа в палаты и т.д. На двери каждой палаты должен быть установлен знак радиационной опасности.

Высокодозовое контактное облучение. Набор помещений в блоке облучения с высокой мощностью дозы примерно такой же, как и для низкодозового блока: кабинеты операционной, радиографической, планирования и лечебное помещение. Все они должны быть расположены поблизости друг от друга, чтобы обеспечивать максимальную пропускную способность и, одновременно, выполнять все необходимые требования по обеспечению радиационной безопасности.

В зависимости от финансовых и строительных возможностей заказчика допустимы следующие комбинации помещений:

– объединение операционной, радиографической и лечебного кабинета в одном и том же помещении: положение эндостата контролируется сразу же после его введения, исключается транспортировка пациента из одного кабинета в другой, но снижается пропускная способность;

– объединение только операционной и радиографической: пропускная способность возрастает, но возникают трудности, связанные с обеспечением стерильности;

– все три кабинета отдельные, но должны быть расположены рядом друг с другом, чтобы исключить возможность смещения уже введенного эндостата внутри тела пациента в процессе его транспортировки.

Требования к операционной и к кабинету дозиметрического планирования – такие

же, как в блоке низкодозового контактного облучения. При большом потоке больных целесообразно иметь также дополнительную операционную для амбулаторных больных, которым не требуется анестезия для размещения катетера или аппликатора, в связи с чем все хирургические манипуляции производятся по упрощенной схеме. Здесь же следует установить рентгеноскопический аппарат для оперативного контроля положения эндостата и коррекции этого положения в случае необходимости, а также для двухпроекционной рентгенографии или рентгеностереосъемки для дозиметрического планирования.

Требования к лечебному кабинету здесь гораздо жестче, чем для низкодозового контактного облучения, и приближаются к требованиям для каньонов дистанционного терапевтического облучения. Здесь, прежде всего, необходим расчет радиационной защиты кабинета, в том числе стен, пола, потолка (если только кабинет не расположен на первом этаже). При этом такой расчет выполняется исходя из геометрии расположения источников в своих крайних положениях, определяемых конструкцией гамма-терапевтического аппарата и его расположением в кабинете. Следует учитывать, что в отличие от дистанционных аппаратов при контактном облучении с высокой мощностью дозы источник жестко не фиксируется и не коллимируется, в связи с чем расчет толщины стен и потолка должен выполняться по исходному нерассеянному излучению источника, т.е. как для первичных радиационно-защитных барьеров. По этой причине уже готовые для дистанционных облучателей каньоны могут не годиться для размещения в них высокодозовых аппаратов контактного облучения.

Пультовая должна находиться рядом с лечебным кабинетом, но рабочее место за пультом управления должно находиться вне прямой видимости входной двери в лечебный кабинет. Пультовая и кабинет должны быть оснащены замкнутой телевизионной системой наблюдения за больным и двусторонним переговорным устройством, негатоскопом для просмотра рентгенограмм и КТ-изображений. Необходимо также оборудование для аварий-

ного удаления источника из тела больного в контейнер временного хранения в безопасном положении, если только источник нельзя извлечь в штатном режиме. На входной двери должна быть установлена блокировка, которая автоматически возвращает источник в контейнер-хранилище аппарата при несанкционированном открывании входной двери, световой индикатор наличия облучения типа «включено – выключено», а также на наружной поверхности двери должна быть нанесена маркировка со знаком радиационной опасности, указанием типа радионуклида и его номинальной активности. В самом лечебном кабинете необходимо установить монитор излучения с автономным электропитанием для контроля радиационной обстановки в помещении, причем прибор может быть снабжен пороговым устройством срабатывания по уровню мощности дозы.

Обеспечение радиационной безопасности пациентов. Принцип обоснованности облучения в лучевой терапии реализуется на основе профессионального решения радиационного онколога (лучевого терапевта) о необходимости проведения конкретному больному индивидуально спланированного терапевтического облучения с целью клинически выраженного улучшения состояния его здоровья. При этом риск от проведения лучевой терапии должен заведомо быть ниже риска от альтернативных (нерадиационных) методов лечения и, тем более, ниже риска отказа от лечения вообще.

Вторым принципом системы ограничения дозы является оптимизация радиационной защиты больного, что реализуется посредством взаимосвязанного совместного выбора адекватной дозы облучения злокачественной опухоли и толерантных доз облучения нормальных тканей организма. Не менее важным элементом оптимизации защиты больного при лучевой терапии является проектирование, эксплуатация и поддержание средств и технологий терапевтического облучения на таком уровне, который обеспечивает оптимальное соотношение между эффективным подавлением злокачественного роста тканей и минимально возможным проявлением лучевых ос-

ложнений. В более широком смысле проблема обеспечения РБ больного предусматривает необходимость специального медицинского и радиационно-физического образования персонала, наличия практических навыков и накопленного клинического опыта в проведении радиационно-терапевтических процедур, адекватного использования радиационных аппаратов и оборудования с современными физико-техническими характеристиками, а также тщательной регистрации непосредственных и отдаленных результатов облучения.

Принцип нормирования дозы в лучевой терапии не применяется, т.к. все облучение направлено на пользу здоровью пациента.

Оптимальное облучение больного связано с наиболее разумным использованием ионизирующего излучения. Существует два вида риска для больного: первый и самый важный – это риск ошибки в радиационном воздействии на опухоль, которая при дальнейшем своем развитии становится смертельной для больного. Второй риск определяется вредностью излучения для нормальных тканей. Лучевая терапия всегда связана с некоторым риском, но риск становится чрезмерным, если суммарная доза облучения, даже с учетом фракционирования, слишком велика или слишком велики радиочувствительность и объем облучаемых нормальных тканей.

На основе многолетнего клинического опыта накоплены достоверные данные по терапевтическим дозам облучения и толерантным дозам облучения окружающих опухоль нормальных тканей. Это позволило математически смоделировать или сформировать непосредственно по таким клиническим данным кривые «доза – эффект» для злокачественных опухолей различной локализации и разных гистологических характеристик, на основе чего были определены соответствующие значения так называемых терапевтических интервалов.

Обеспечение РБ больного при лучевой терапии практически полностью определяется системой гарантии качества облучения, используемой в данном медицинском учреждении. В свою очередь, гарантия качества базируется на тщательном выполнении требова-

ний по точности подведения дозы и по контролю радиационно-физических характеристик применяемых аппаратов и оборудования.

Требования к точности подведения дозы меняются в зависимости от цели облучения. К детальному планированию облучения в больших терапевтических дозах, близких к толерантным дозам для нормальных тканей, предъявляются повышенные требования. При этом наибольшая точность требуется при облучении большими дозами мишеней, расположенных рядом с нормальными тканями, критическими по радиочувствительности. При паллиативном облучении применяются меньшие дозы, и требования по точности дозирования могут быть несколько снижены.

По достоверным статистическим данным, даже в современных зарубежных радиационно-терапевтических центрах у 3–4% больных наблюдаются отклонения суммарной очаговой дозы в опухоли за полный курс облучения на 5% и более вследствие случайных и систематических ошибок и погрешностей. Сюда входят технические и технологические неточности: погрешности топографии, дозиметрического планирования, повседневные ошибки позиционирования тела больного, наведения пучка излучения, стабильности параметров радиационного поля и т.д. Есть также ошибки, связанные непосредственно с самим облучаемым больным. К ним относятся погрешности определения положения мишени и окружающих ее органов и тканей, учета формы поверхности тела и его гетерогенностей при расчетах дозовых распределений, а также погрешности, связанные с изменением положения кожных меток и маркеров на теле больного, с изменением размеров и формы его тела и органов, с недостаточной фиксацией тела пациента при облучении, со спонтанными смещениями тканей и органов в курсе облучения (например, вследствие дыхания, перистальтики кишечника) и т.д.

Точность измерений дозы зависит от качества используемых приборов и точности их дозовой калибровки. При внешнем облучении дозы облучения в опорных точках при референсных условиях должны быть измерены с погрешностью не более $\pm 3\%$. Измерения глу-

бинных доз, коэффициентов ослабления клиновидных фильтров и подставок для блоков должны выполняться с погрешностью не более 0,5–1,0%. При этом дозиметры для контроля заданной дозы в объеме мишени следует периодически калибровать через определенные интервалы времени по вторичному эталону, который, в свою очередь, калибруется по национальному или международному первичному эталону.

При внутритканевом или внутритканевом облучении погрешность измерений мощности дозы не должна превышать $\pm 5\%$. Активность следует измерять при получении нового источника. Если имплантируется группа источников небольшой активности, например, при внутритканевом облучении рака предстательной железы гранулами ^{125}I , общую активность нужно знать с погрешностью не более $\pm 5\%$, а активности отдельных источников не должны отличаться более чем на 10%.

Задача планирования облучения заключается в таком управлении облучением, при котором поглощенная доза в объеме мишени соответствовала бы в пределах $\pm 5\%$ заданной дозе, и в то же время доза в окружающих нормальных тканях получалась минимальной.

Анатомические данные о конкретном больном для планирования его облучения следует определять при нахождении тела пациента в предполагаемом положении облучения. Для топографии предпочтительнее использовать компьютерные томографы-симуляторы, как обеспечивающие более высокую точность, чем конвенциональные рентгеновские симуляторы. В области черепа контуры тела можно определять с погрешностью 2–3 мм, а в области живота – около 10 мм, однако контуры тела могут меняться во время сеанса облучения. Если в курсе сеансов облучения возникает подозрение на значительное изменение контуров тела, например в результате регрессии опухоли или резкого уменьшения массы тела пациента, контуры следует определить снова и соответственно откорректировать дозиметрический план.

Перед началом курса лучевой терапии необходимо проверить, по крайней мере, максимальную и минимальную дозы в объеме

мишени, а также дозы, которые будут подведены к наиболее радиочувствительным тканям, где высока вероятность возникновения лучевых осложнений. При каждом сеансе облучения следует регистрировать суммарные дозы и независимо контролировать их через определенные промежутки времени.

При дистанционном облучении больного его укладка на ложе радиационно-терапевтического аппарата должна соответствовать укладке на симуляторе облучения и быть воспроизводимой в последующих сеансах облучения. Больной должен находиться в удобном положении и быть в максимально возможной степени неподвижным при облучении. С этой целью следует использовать специальные приспособления для иммобилизации больного, которые теперь уже изготавливают в индивидуальном порядке по данным топографии. Если положение больного изменяется, облучение должно быть немедленно прервано, и позиционирование больного нужно выполнить заново.

Если даже план облучения не предусматривает учета особого риска клинически значимых доз облучения нормальных органов и тканей, желательно провести *in vivo* дозиметрические измерения в ходе первого или нескольких начальных сеансов облучения. Тогда можно оценить реальные дозы облучения критических органов, в первую очередь кожи, и сравнить их с их запланированными значениями. При их заметном расхождении можно своевременно внести соответствующие коррективы в рассчитанный дозиметрический план для последующих сеансов облучения.

Здесь невозможно изложить полностью все методические рекомендации по гарантии качества лучевой терапии для большого разнообразия радиационно-терапевтических аппаратов и технологий терапевтического облучения. Существует большое количество официальных публикаций ВОЗ, МАГАТЭ, МКРЗ, ЮОМР (Международной организации по медицинской физике), ЕФОМР (Европейской федерации организаций по медицинской физике) и ААРМ (Американской ассоциации медицинских физиков), посвященных вопро-

сам гарантии качества лучевой терапии и обеспечения РБ пациентов при терапевтическом облучении. Переводы на русский язык наиболее важных из них опубликованы в журнале «Медицинская физика», полный комплект которого имеется в Ассоциации медицинских физиков России.

Обеспечение радиационной безопасности персонала. При терапевтическом облучении основными мерами по обеспечению РБ персонала являются:

- правильный выбор расположения в радиологическом корпусе каньонов с радиационно-терапевтическими установками, конфигурации и размеров каждого каньона, материала и толщины их защитных стен, геометрии и размеров защитного лабиринта в каньоне;

- предотвращение попадания лиц из персонала в каньон в ходе терапевтического облучения больного, а также в ходе регламентных работ по ремонту, наладке, испытаниям и калибровке аппаратуры и оборудования, находящихся в каньоне, когда включен пучок электронного или фотонного излучения;

- предотвращение аварийного облучения в ходе указанных работ при случайном или ошибочном включении пучка излучения;

- минимизация уровня профессионального облучения, обусловленного наведенной радиоактивностью в элементах конструкции радиационной головки высокоэнергетических медицинских ускорителей;

- использование известных принципов защиты временем, расстоянием и экранированием при работе с гамма-терапевтическими аппаратами для внутритканевого и внутрислоистного облучения;

- выполнением программ гарантии качества радиационно-терапевтических установок и радиационного контроля уровней внешнего облучения персонала.

Здесь отметим только, что существующие нормативы и технологии проектирования и строительства радиологических корпусов обеспечивают заведомое не превышение установленных пределов доз профессионального облучения персонала.

Для всех рентгенотерапевтических и гамма-терапевтических аппаратов, а также для линейных ускорителей необходимо использовать блокировку, исключающую возможность входа лиц из персонала в каньон во время работы установки. Блокировка должна быть, как минимум, продублирована и должна надежно выключать оборудование при открывании входной двери каньона. Возвращение установки в рабочее состояние должно выполняться только с пульта управления. Функционирование блокировки следует регулярно проверять, в том числе и в рамках программ гарантии качества аппаратуры и оборудования. Необходимо предпринять меры для исключения случайного входа кого-либо в каньон во время облучения, приводящего к прерыванию сеанса лучевой терапии, а также для исключения случайного нахождения кого-либо из персонала во время работы установки. Входная дверь в каньон должна легко открываться вручную изнутри. Сигнализация внутри каньона и в пультовой должна предупреждать персонал о начале и окончании облучения.

При проведении регламентных работ по техническому обслуживанию и калибровке радиационно-терапевтических аппаратов радиационная головка должна быть снабжена устройством подачи звукового сигнала и (или) устройством хорошо видимого светового сигнала, который подается при несанкционированном включении установки с пульта управления. Кроме того, внутри каньона необходимо поместить измеритель мощности дозы со звуковым или световым индикатором, который включается при превышении порогового значения мощности дозы в каньоне.

При использовании терапевтических ускорителей с пучками тормозного излучения выше 10 МВ в мишени ускорителя, выходном окне его вакуумной камеры и в выравнивающем фильтре за счет фотоядерных реакций возникает наведенная радиоактивность. При этом образуется совокупность коротко- и среднеживущих радионуклидов, испускающих гамма-кванты различных энергий и после выключения ускорителя. К ним относятся ^{185}W , ^{54}Mn , ^{196}Au , ^{51}Cr , ^{57}Co и некоторые дру-

гие радионуклиды с периодами полураспада от 6 до 300 суток. Однако их активность не превышает нескольких кБк, вследствие чего уровень дополнительного облучения в непосредственной близости от радиационной головки ускорителя существенно ниже обычного уровня лабораторного радиационного фона внутри каньона.

Обеспечение РБ персонала, работающего на гамма-терапевтических аппаратах для контактного облучения, имеет свою специфику, обусловленную необходимостью выполнения процедур подготовки, введения в тело больного и удаления из него закрытых радионуклидных источников. Для безопасной эксплуатации таких источников должны выполняться следующие требования:

- каждый источник должен иметь ясно различимые метки, позволяющие достоверно определить вид радионуклида, его активность и инвентарный номер;

- обеспечение жесткого контроля места пребывания источника: он может находиться только в хранилище, в устройстве его местной транспортировки или в теле больного;

- регулярные проверки (не реже одного раза в год) каждого источника на наличие поверхностного радиоактивного загрязнения; при обнаружении нефиксированного («снимаемого») загрязнения свыше 2 кБк следует считать источник негерметичным; немедленно должны быть приняты меры по ремонту или списанию источника, а установка должна подвергнуться дезактивации;

- в помещениях, смежных с процедурным кабинетом (каньоном), необходим периодический контроль мощности дозы гамма-излучения;

- хранилище источников должно быть обеспечено соответствующими устройствами, позволяющими определить, сколько источников и какие именно из них находятся на хранении в настоящий момент времени;

- хранилище должно быть постоянно закрыто и находиться под охранной сигнализацией;

- после каждой терапевтической процедуры контактного облучения и удаления источников из тела больного его следует под-

вергнуть радиационному контролю с помощью переносного измерителя мощности дозы, чтобы убедиться, что внутри тела не осталось никакой радиоактивности.

Для гамма-терапевтических аппаратов, обеспечивающих контактное облучение по технологии последовательного введения источников с высокой мощностью дозы, имеют место также и другие дополнительные требования:

- после каждого использования источника необходимо визуально проинспектировать его состояние с использованием установки промышленного телевидения или защитной камеры с просвинцованным стеклом;

- на защитном сейфе, где хранятся такие источники, должна быть ясная схема их размещения внутри сейфа, чтобы нужный источник можно было найти и забрать в минимально короткий интервал времени;

- для перемещения источников обязательно использовать дистанционные манипуляторы типа шпаговых держателей;

- транспортировка источников из хранилища в процедурную производится только в защитных контейнерах на транспортной тележке;

- после удаления из тела больного источники должны быть подвергнуты процедуре стерилизации; т.к. при этом они могут быть повреждены вследствие нагревания, абразивного истирания, химических реакций или механического воздействия; их следует снова визуально проконтролировать;

- окраска поверхности источника должна быть яркой, чтобы его можно было легко найти при потере;

- раковина для слива сточных вод после стерилизации или дезактивации поверхности источника должна быть снабжена защитной решеткой, размеры отверстий на которой меньше минимального габаритного размера источника;

- транспортировочные шланги и их сопряжения с другими элементами конструкции гамма-терапевтического аппарата необходимо регулярно контролировать с целью предотвращения застревания в них источников.

К радиационному контролю персонала и его рабочих мест предъявляются обычные

требования. В частности, для контроля уровня облучения гамма-квантами или тормозным излучением рекомендуется использовать индивидуальные термолюминесцентные дозиметры, носимые на халате в области груди или живота. Контроль мощности дозы фотонного излучения на рабочих местах и в контрольных точках за радиационной защитой каньона осуществляется с помощью дозиметров на основе счетчиков Гейгера – Мюллера или сцинтилляционных детекторов, причем отечественная аппаратура вполне отвечает необходимым для этого требованиям. Однако для контроля облучения персонала фотонейтронами вне каньона высокоэнергетического ускорителя, особенно в непосредственной близости от входной двери защитного лабиринта, до сих пор отсутствуют простые и надежные технологии, позволяющие достоверно измерять соответствующую мощность эквивалентной дозы.

Профилактика и устранение последствий радиационных аварий. Радиационные аварии (РА) в радиологических подразделениях медицинских учреждений происходят относительно редко, но некоторые из них могут иметь достаточно тяжелые последствия для некоторых лиц из персонала и населения. По вероятности возникновения РА на первом месте идут подразделения ядерной медицины, особенно радионуклидной терапии, далее идут подразделения лучевой терапии закрытыми источниками и только потом – рентгенодиагностики и интервенционной радиологии. Однако по степени тяжести возможных последствий для пострадавших в аварии подразделения ядерной медицины и лучевой терапии следует поменять местами.

Система обеспечения РБ больных, персонала и отдельных лиц из населения, действующая в подразделениях лучевой диагностики и терапии, должна включать мероприятия по предупреждению и предотвращению РА, по обеспечению адекватных действий персонала при возникновении аварийных ситуаций и по исключению или минимизации радиационного воздействия на пациентов, персонал и население при ликвидации последствий РА. Планировка помещений этих подразделений и

их оснащение должны обеспечивать безусловное выполнение этих мероприятий.

Причины радиационных аварий. Подавляющее большинство РА происходит вследствие человеческого фактора, т.е. из-за ошибок персонала при реализации тех или иных технологических этапов сложного процесса лучевой терапии. Дело в том, что от момента назначения на лучевую терапию до момента окончания курса облучения больной проходит через большое число таких этапов, причем они реализуются либо отдельно, либо при совместном взаимодействии сотрудников с разными профессиями. Кроме того, несмотря на высокую техническую и технологическую оснащенность современных подразделений лучевой терапии, многие процедуры на этих технологических этапах выполняются вручную, например, укладка пациента.

Поэтому большинство РА происходят вследствие:

- технических погрешностей и сбоев в работе аппаратуры и вспомогательного оборудования; особенно тяжелые последствия для пациентов представляют собой ошибки при введении в эксплуатацию новых аппаратов и при калибровке пучка излучения или радионуклидных источников;

- человеческих ошибок при взаимодействии специалистов различного профиля, включая неправильное оформление медицинской и технической документации;

- ошибочной интерпретации результатов топометрии, считывания показаний контрольных приборов и аварийных пороговых дозиметров, данных дозиметрического планирования, динамического наблюдения за состоянием больного в ходе курса лучевой терапии и т.д.;

- ошибочного распознавания нештатной ситуации: поскольку персонал обучен действиям только в штатных ситуациях, а нештатные инциденты возникают сравнительно редко, то в ходе развития подобных инцидентов недостаток нужного опыта приводит к усугублению ошибок и, в результате, к РА;

- нерегулярного или небрежного выполнения программ гарантии качества аппаратуры и радиационных технологий;

- внешних воздействий природного характера (землетрясение, наводнение, смерч, ударная волна и т.д.) и техногенного характера (поражение персонала электрическим током, отключение электричества, пожар, разрывы линий водопровода и канализации и т.д.)

Классификация радиационных аварий. Наиболее серьезными по своим последствиям для пациентов, персонала и населения являются следующие проектные РА (радиационные инциденты класса П-1):

- потеря радионуклидного источника излучения;

- застревание радионуклидного источника в рабочем положении или в подводящих каналах внутри радиационной головки дистанционного гамма-терапевтического аппарата или внутри эндостата при контактном облучении;

- возникновение радиоактивных загрязнений на различных рабочих поверхностях и на теле больного (или внутри него) вследствие нарушения целостности герметической оболочки закрытого радионуклидного источника;

- клинически выраженное избыточное облучение пациента в результате ошибок топометрии, дозиметрического планирования, проведения собственно облучения и человеческого фактора;

- неоправданно избыточное облучение персонала, которое является, как правило, результатом нарушений установленных технологий работы с источниками излучения, собственной невнимательности или ошибочной интерпретации показаний контрольных приборов, индикаторов и аварийных дозиметров.

К нерадиационным авариям (нерадиационные инциденты класса П-2) относятся:

- возгорание (задымление) или пожар в рабочих помещениях подразделения лучевой терапии;

- несанкционированное действие, акт или несанкционированный доступ в отношении радионуклидных источников и помещений их использования, транспортирования и хранения;

- нарушение нормального санитарного состояния помещений и оборудования в под-

разделении лучевой терапии, в том числе вследствие протечек водопровода, отопления, хозяйственно-бытовой канализации, но без контакта протекшей воды с радионуклидными источниками;

– отключение электроснабжения, сбой или неисправности электропитания аппаратуры и оборудования, которые ведут к нарушениям правил электробезопасности для пациентов и персонала, но без нарушения радиационной безопасности людей.

Профилактика радиационных аварий. В качестве профилактических мероприятий по предотвращению радиационных аварий (радиационных и нерадиационных происшествий) следует применять:

– выполнение наиболее важных технологических процедур несколькими специалистами независимо друг от друга: в частности, калибровку пучков излучения должны проводить два различных медицинских физика, а результаты дозиметрического планирования должны обязательно перепроверяться;

– обучение персонала распознаванию сбоев и технологических ошибок;

– разработку программ подготовки и методик проведения противоаварийных тренировок персонала для отработки действий в условиях аварии (происшествия) и проведение тренировок; персонал должен быть подготовлен к действиям при авариях (происшествиях) и действиям по ликвидации их последствий;

– составление подробного описания всех технологических этапов радиационно-терапевтических процедур, включая общение между специалистами различного профиля;

– письменный анализ всех проектных радиационных аварий и необходимых действий персонала по ликвидации или смягчению их последствий;

– проверку наличия и регулярный контроль состояния системы пожарной безопасности;

– регулярную проверку комплектности и исправности гамма-терапевтического аппарата и остального радиационно-технического оборудования;

– регулярный контроль уровня знаний персонала с последующей официальной аттестацией сотрудников, в том числе по действиям персонала при радиационных авариях, пожарах и задымлении.

В подразделении лучевой терапии должны быть утвержденные администрацией учреждения: а) инструкция по общей и радиационной безопасности и б) инструкция по предупреждению и ликвидации аварий (пожара) и нештатных ситуаций. В них должны быть отражены следующие положения:

– прогноз возможных аварийных ситуаций и аварий (пожара) и меры по их предупреждению;

– прогноз радиационной обстановки в случае возникновения радиационной аварии или другой нештатной ситуации;

– технологии обнаружения радиационных аварий;

– действия персонала при радиационной аварии и при других нештатных ситуациях, в том числе и при пожаре;

– порядок ликвидации последствий радиационных аварий и нештатных ситуаций;

– порядок информирования о возникновении радиационной аварии, пожара и нештатной ситуации;

– план мероприятий по защите пациентов и персонала при аварийных ситуациях;

– ответственность администрации за проведение мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий аварий;

– показатели ликвидации аварии и завершения аварийной ситуации;

– план подготовки и обучения персонала действиям при аварийных ситуациях.

В производственных помещениях подразделения лучевой терапии должны быть средства по предупреждению и ликвидации нештатных ситуаций, пожара и радиационных аварий:

– аварийный комплект для ликвидации последствий радиационных аварий;

– комплект для оказания первой медицинской помощи;

– комплект оборудования для ликвидации пожара и задымления (огнетушители, песок, покрывала и т.д.);

– вывешенная на стене помещения выписка из инструкции по действиям персонала при возникновении радиационных аварий и других нештатных ситуаций.

В состав аварийного комплекта средств для ликвидации последствий радиационных аварий должны входить:

– комплект защитной одежды, включая хирургические перчатки, пластиковые бахилы, шапочку и респиратор;

– средства дезактивации, включая впитывающие материалы для вытирания загрязненных рабочих поверхностей, детергенты и фильтровальную бумагу;

– инструменты для дистанционного сбора использованных впитывающих материалов и загрязненных предметов;

– пластиковые мешки для сбора, временного хранения и удаления твердых радиоактивных отходов;

– комплект аварийных знаков радиационной опасности на устойчивых штативах, выставляемых у места радиационной аварии;

– инструкция по дезактивации загрязненных рабочих поверхностей различного типа.

Технологии ликвидации последствий РА. Действия персонала при типичных РА:

– поставить в известность заведующего подразделением лучевой терапии, службу РБ медицинского учреждения и, в случае необходимости органы Роспотребнадзора, Ростехнадзора и МВД;

– при потере контроля или утрате радионуклидного источника – на основе действующей системы инвентаризации и отслеживания траектории его перемещения в подразделении лучевой терапии определить тип и активность пропавшего источника и достоверно установить последнее место его пребывания; поиск источника следует производить совместно со службой РБ медицинского учреждения как визуально, так и с использованием высокочувствительной аппаратуры радиационного контроля;

– при застревании радионуклидного источника в транспортных каналах аппарата – произвести попытку возвращения источника в положение хранения; если повторная попытка вернуть источник в нерабочее положение не приводит к положительному результату, то следует немедленно вывести больного из каньона или вынуть из его тела эндостат с источником, после чего принять меры по устранению последствий РА;

– при разгерметизации закрытого радионуклидного источника – после удаления источника из рабочего положения, в том числе из тела больного, необходимо принять меры по дезактивации загрязненных поверхностей, в том числе по дезактивации кожных покровов и слизистых оболочек тела больного, а также по недопущению дальнейшего распространения радиоактивных загрязнений в другие помещения.