

УДК 615.849.1

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДОЗИМЕТРИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В МЕДИЦИНЕ

Наведені та проаналізовані сучасні методи та засоби дозиметрії, показані переваги і недоліки кожного з них. В результаті роботи обраний метод термолюмінесцентної дозиметрії для подальших досліджень в області дозових навантажень на пацієнтів

Ключові слова: дозиметрія, випромінювання, термолюмінесцентний метод

Приведены и проанализированы современные методы и средства дозиметрии, показаны достоинства и недостатки каждого из них. В результате работы выбран метод термолюминесцентной дозиметрии для дальнейших исследований в области дозовых нагрузок на пациентов

Ключевые слова: дозиметрия, излучение, термолюминесцентный метод

The modern dosimetry methods and techniques are presented and analyzed; the advantages and disadvantages of each method are shown. As a result the method of thermoluminescence dosimetry is chosen for further research in the field of patient's absorbed radiation dose determination

Keywords: dosimetry, radiation, thermoluminescent method

А.С. Гвай*

Контактный тел.: 063-105-20-15

E-mail: allo4ka@mail.ru

Л.А. Аверьянова

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: 067-570-63-39

E-mail: liandr@ukrpost.ua

*Кафедра биомедицинских электронных устройств и систем

Харьковский национальный университет радиозлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166

О.Ю. Шалёпа

Младший научный сотрудник

Центральная лаборатория радиационной гигиены

медицинского персонала и пациентов

Институт медицинской радиологии им. С.П.

Григорьева НАМНУ

ул. Пушкинская, 82, г. Харьков, 61024

E-mail: olsha69@mail.ru

Введение

Дозиметрия ионизирующих излучений (ИИ) рассматривает свойства ИИ, физические величины, характеризующие поле излучения или взаимодействие излучения с веществом, а также принципы и методы их определения.

Количественное определение дозы излучения, действующей на живой организм, необходимо, прежде всего, для выявления, оценки и предупреждения возможной радиационной опасности для человека [1].

В настоящее время основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников радиации, вносят медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением радиоактивности. Ионизирующее излучение широко используется для лечения онкологических заболеваний. Однако при неоптимальном выборе плана лечения дозы облучения могут оказаться неоправданно высокими, что может привести к значительным лучевым повреждениям [2].

Поэтому одной из неотъемлемых составляющих современной радиотерапии является клиническая дозиметрия, важнейшей задачей которой является определение дозы излучения в различных средах, и особенно – в тканях живого организма. Для этого

используют различные расчетные и экспериментальные методы [3].

Поэтому целью данной статьи является сравнительный анализ методов с точки зрения применимости в медицине, выбор наиболее оптимального метода дозиметрии для дальнейшего проведения исследования в области экспериментального определения доз облучения.

Анализ основных методов клинической дозиметрии

Развитие дозиметрии первоначально полностью определялось необходимостью защиты человека от вредного воздействия ионизирующих излучений. Вскоре после открытия рентгеновского излучения (1895 г.) было обнаружено его вредное действие на человека, и возникла необходимость в количественной оценке степени радиационной опасности [2].

Для обнаружения радиоактивных излучений (нейтронов, гамма-лучей, бета- и альфа-частиц) используют их способность облучать вещество среды, в которой они распространяются.

Вследствие облучения какого-либо материала происходит изменение физических и химических параметров в материале [3]. К таким изменениям среды относятся: изменения электропроводности веществ;

люминесценция (свечение) некоторых веществ; засвечивание фотопленок; изменение цвета, окраски, прозрачности, сопротивления электрическому току некоторых химических растворов и др. Именно по этим изменениям можно обнаружить источники радиоактивного излучения, также по ним можно определить какое это излучение и дать какую-то его оценку.

Основными методами для обнаружения и измерения ионизирующих излучений являются:

- сцинтилляционный,
- фотографический,
- химический,
- ионизационный [2].

В ранний период становления дозиметрии использовались фотографические действия ионизирующих излучений, химические превращения и выделение тепла.

По мере развития методов регистрации элементарных частиц развивались и методы дозиметрии. В современных условиях используется широкий спектр радиационно-индуцированных эффектов. Специфическими параметрами, характеризующими эффективность каждого из применяемых методов дозиметрии, являются:

- фединг (спад показаний во времени);
- диапазон энергий излучения;

- вид регистрируемого излучения;
- тип первичного преобразователя;
- мощности дозы;
- энергетическая зависимость [1].

Фотографический метод основан на степени почернения фотоэмульсии. Этот принцип использован в фотодозиметрах, однако чувствительность таких дозиметров несколько меняется в зависимости от энергии падающего излучения, особенно для фотонов с энергиями меньше 300 кэВ. Кроме того, трудности, связанные с процессом проявления, могут ограничить воспроизводимость полученных результатов [2].

Фотодозиметры можно с определенными предосторожностями использовать как простые и дешевые интегрирующие детекторы излучения. Фотодозиметры особенно пригодны для индивидуальной дозиметрии большого числа людей, но в особых случаях (переоблучение и др.) их использование должно быть дополнено применением более точных дозиметрических приборов (табл. 1).

В настоящее время фотографический метод широко применяется в ядерной физике при исследовании свойств самых различных заряженных частиц, их взаимодействий и ядерных реакций [1].

Химический метод дозиметрии основан на измерении числа молекул ионов, образующихся или пре-

Таблица 1

Дозиметрические параметры методов

Дозиметрический параметр	Тип дозиметра			
	Фотографический	Ионизационный	Радиофотолюминесцентный	Термолюминесцентный на основе LiF
Нижний предел измерения, мГр	0,5	0,05	0,1	0,1
Верхний предел измерения, Гр	1	2	102	103
Диапазон измерения доз	узкий	узкий	широкий	наибольший
Чувствительность	низкая	высокая	высокая	высокая
Фединг	высокий	высокий	очень низкий	почти отсутствует
Энергетическая зависимость	10–12	1,1	7	1.35
Влияние внешнее, искажающее показания	Нагрев до 40°C, влажность, освещение	Влажность, механическое воздействие	Нагрев до 500°C, интенсивное освещение, загрязнение детектора, влажность	Нагрев > 80°C, загрязнение детектора
Потеря информации	10 % за мес.	3 % за 24 часа	1 % за 6 мес.	< 5 % за 1 год
Срок хранения до облучения	1–2 года	Не ограничен	Не ограничен	Не ограничен
Время снятия показаний	1 час	1 мин	10 мин	1 мин
Повторное снятие показаний с однократно облученного детектора	Возможно	Невозможно	Возможно	Возможно только на специальных установках
Регистрируемое излучение:				
рентгеновское	+	–	+	+
β-излучение	+	–	+	+
γ-излучение	+	+	+	+
нейтроны	+	–	–	–

терпевших изменения при поглощении веществом излучения. Число образующихся молекул или ионов (выход радиационно-химической реакции) пропорционально поглощенной дозе излучения. Многие химические дозиметры представляют собой водные растворы некоторых веществ. Наиболее распространенной химической дозиметрической системой применяемой является раствор соли FeSO_4 в разбавленной серной кислоте.

В состав химических дозиметров тепловых нейтронов добавляют небольшое количество солей бора или лития. Основным компонентом дозиметра данного метода является вода, и по поглощению фотонного излучения эффективный атомный номер раствора близок к эффективному атомному номеру воды, а, следовательно, и живой ткани [3]. Поэтому дозиметр практически не имеет хода с жесткостью в диапазоне энергий 100 кэВ+2 МэВ. Погрешность измерения составляет не более 1%. Обладая рядом бесспорных преимуществ, химический метод, тем не менее, крайне редко используется в практической дозиметрии, так как даже у наиболее чувствительных химических дозиметров нижний предел измерения составляет порядка 5 сГр.

Биологический метод дозиметрии занимает особое место в клинической дозиметрии, поскольку использует в качестве меры дозиметрической величины количественные радиобиологические эффекты, например хромосомные aberrации, изменение морфологического состава крови и другие показатели, однозначно связанные с дозиметрией ионизирующих излучений. В биологическом методе вид преобразований в облученном веществе зависит от типа ионизирующего излучения. Поток заряженных частиц, проходя через вещество, взаимодействует, в основном, с электронами атомов и передает им свою энергию, которая расходуется на ионизацию и возбуждение атома [1].

Биологические эффекты, наблюдаемые под воздействием заряженных частиц, нейтронов и квантов, обусловлены не их физической природой, а количеством поглощенной энергии и ее пространственным распределением, характеризуемым линейной плотностью ионизации. Чем выше линейная плотность ионизации или, иначе, линейная передача энергии (ЛПЭ), тем больше степень биологического повреждения.

Эта степень определяет относительную биологическую эффективность (ОБЭ) различного рода излучений [3].

Биологическое действие излучения является основой биологической дозиметрии и используется главным образом для установления ОБЭ. Биологические методы дозиметрии базируются на определении морфологических и функциональных изменений, возникающих в организме под влиянием облучения. Величину дозы оценивают по уровню летальности животных, изменению окраски кожи, выпадению волос, появлению или увеличению содержания некоторых веществ в моче, изменению количества кровяных клеток, т.е. состава крови и др.

Биологические методы дают в основном качественную дозиметрическую оценку. Биологические методы не очень точны [1].

Ионизационный метод дозиметрии основан на эффекте ионизации облучаемой среды. Если поместить непроводящее электрический ток вещество в поле действия ионизирующего излучения, то часть энергии излучения передается атомам и молекулам этого вещества и расходуется на их ионизацию. При отсутствии электрического поля в веществе устанавливается равновесная концентрация ионных пар. Если к веществу приложить разность потенциалов, то в нем возникает электрическое поле, и протекает электрический ток. При определенных условиях сила тока пропорциональна интенсивности излучения, воздействующего на вещество. Ионизационные детекторы по конструкции подобны конденсаторам, то есть имеют два электрода, разделенные диэлектриком. В качестве диэлектрика обычно используют газ или смесь газов.

Люминесцентный метод дозиметрии основан на том, что в некоторых веществах (люминофорах) образованные под действием ионизирующего излучения носители заряда (электроны и дырки) локализуются в центрах захвата, благодаря чему происходит накопление поглощенной энергии, которая может затем высвободиться при дополнительном внешнем воздействии (возбуждении).

В дальнейшем световые вспышки переводятся в электрический сигнал. В зависимости от внешнего воздействия на люминофор различают методы, основанные на фото-, радиофото-, радиотермолюминесценции, термостимулированной экзотермии, на эффекте радиационно-стимулированного изменения концентрации носителей заряда в полупроводниках с р-п-переходом и т. п. Соответственно на основе различных твердотельных материалов разработаны фото- и термолюминесцентные детекторы, термоэлектронные и полупроводниковые детекторы, обладающие разнообразными эксплуатационными возможностями и технико-экономическими показателями [1-3].

Так, основанные на эффекте свечения при нагреве облученных твердых тел (кристаллофосфоров) термолюминесцентные детекторы (ТЛД) могут использоваться при повышенных температурах (в зависимости от температурного положения характеристического максимума), обладают достаточно высокой чувствительностью к ионизирующим излучениям различного вида (в зависимости от материала) [4].

В табл. 2 приведен результат анализа достоинств и недостатков наиболее часто применяемых методов дозиметрии.

Целью применения методов дозиметрии в медицине является:

- контроль облучения;
- контроль радиоактивного заражения радиоактивными веществами людей;
- радиометрический контроль загрязненности кожных покровов и средств индивидуальной защиты;
- контроль характера, динамики и уровня поступления радиоактивных веществ в организм с использованием методов прямой и косвенной радиометрии;
- контроль доз внешнего β -, γ - и рентгеновского излучений, а также нейтронов;

Таблица 2

Сравнительный анализ методов дозиметрии

Метод	Достоинства	Недостатки
Фотографический	1. Низкая стоимость детектора и аппаратуры; 2. Документирование 3. Возможность получения информации о качестве излучения, об умышленном облучении	1. Большая энергетическая зависимость; 2. Относительная сложность и трудоемкость обработки детектора, требующей стандартных условий; 3. Применение расходных материалов
Ионизационный	1. Низкая стоимость, простота, доступность детектора и аппаратуры; 2. Оперативность получения информации, прямой отсчет дозы в некоторых моделях	1. Значительная энергетическая зависимость большинства моделей (большой ход с жесткостью); 2. Зависимость показаний от мощности дозы
Радиофотолуминесцентный (РФЛ)	Возможность повторного измерения дозы;	1. Значительная энергетическая зависимость; 2. Большая чувствительность к загрязнениям поверхности детектора
Термолюминесцентный (ТЛД)	1. Отсутствие зависимости показаний от мощности дозы; 2. Сравнительно небольшая энергетическая зависимость; 3. Возможность полной автоматизации процесса измерения, записи показаний и передачи их в ЭВМ	1. Изменение чувствительности детекторов к излучению; 2. Сложность аппаратуры; 3. Высокая начальная стоимость; 4. Потеря информации после считывания

- определение поглощенных доз облучения в отдельных органах, тканях, частях тела и во всем теле пострадавшего для оценки тяжести радиационного поражения, планирования лечения и оценки исхода аварийного облучения пациента.

Для дальнейших исследований в области экспериментального определения дозовых нагрузок на органы и организм пациента среди всех методов дозиметрии был выбран метод ТЛД, поскольку данный метод имеет высокую чувствительность к ионизирующему излучению в диапазоне доз, допустимом для клинических технологий. В клинической дозиметрии данный метод используется для индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения персонала и населения, поскольку имеют малый размер (очень выгоден в чрезвычайных ситуациях), возможность их повторного использования облегчает их применение и выгодна для экспериментов.

Метод ТЛД основан на том, что некоторые неорганические вещества с определенным сочетанием дефектов кристаллической решетки примесного и собственного происхождения (так называемые запаасающие кристаллофосфоры) после возбуждения ионизирующим излучением при нагревании испускают свет. Количество испущенных при этом оптических квантов оказывается пропорциональным поглощенной дозе ионизирующего излучения [1].

Электронные элементы, составляющих детектор, при поглощении энергии возбуждаются и переходят в более высокое энергетическое состояние, и эта энергия накапливается в детекторе.

Детектор нагревается до определенной температуры, при которой энергия, накопленная в детекторе, будет освобождаться в виде импульсов света, и это количество света может быть зарегистрировано специальным оборудованием и пересчитано в дозу облучения.

Наибольшее распространение получили дозиметры на основе LiF и CaF₂ [4], так как они относятся к самым чувствительным дозиметрам, тканеэквивалентны мягким тканям человека, дозиметрическая

характеристика их линейна в некотором диапазоне, энергетическая зависимость выравнивается фильтрами, фединг почти отсутствует. Чаще всего детекторы изготавливаются в форме таблеток диаметром 4,5-5 мм и толщиной порядка 1 мм.

Основные характеристики ТЛД на основе LiF приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные характеристики детекторов на основе LiF

Температура высвечивания основного пика, °С	210
Порог измеряемых доз	10 мкГр
Энергетическая зависимость (30 кэВ – 1,3 МэВ)	<30%
Потери дозовой информации при комн. температуре	5 % в год
Возможность повторного применения	неограниченое
Область линейных показаний, Гр	5*10 ⁻⁵ – 5

На рис. 1 представлена кассета термолюминесцентного дозиметра с двумя детекторами.



Рис. 1. Кассета термолюминесцентного дозиметра

Применение ТЛ-детекторов требует определенной технологической подготовки. Перед использованием необходимое количество детекторов моют спиртом-ректификатом в стеклянном химическом стакане и высушивают на фильтровой бумаге в воздухе. После этого проводят обязательную термообработку ТЛ-детекторов. Ее основной целью является воспроизведение дозиметрических свойств ТЛ-материала (удаление дозиметрической информации остаточной светосуммы от предыдущего их использования, а также от природного радиационного фона, накопленного за период хранения детекторов). После проведения указанных выше операций ТЛ-детекторы можно использовать для облучения.

Преимущество ТЛД перед другими дозиметрами состоит в их высокой чувствительности к ионизирующему излучению и сравнительно небольшой себестоимости.

Кроме этого, ТЛД относятся к интегральным дозиметрам, которые регистрируют ионизирующее излучение постоянно, с момента их подготовки к экспонированию и до момента измерения отклика детекторов, входящих в состав дозиметра. Как правило, после измерения отклика детекторов дозиметр снова готов к регистрации ионизирующего излучения (возможно многократное использование). При практическом использовании для индивидуального контроля ТЛ-дозиметры легко закрепляются на одежде, при необходимости – на теле человека,

могут размещаться внутри фантомных объектов для моделирования распределения доз внутри тела при проведении диагностических и лечебных процедур, связанных с воздействием ИИ.

Выводы

Основной вклад в дозу, получаемую человеком, вносят медицинские исследования, поскольку в повседневной медицинской практике очень часто прибегают к помощи рентгеновских установок и других источников радиации. Поэтому во всех лечебных учреждениях необходимо четкое регулирование уровня ионизирующих излучений с учетом их биологического действия. Для этого разработаны различные методы: биологические, фотохимические, физические, сцинтилляционные, люминесцентные, которые были рассмотрены и проанализированы в данной статье.

Каждый из предложенных методов в достаточной степени отображает уровень радиации, но при клиническом применении имеет ряд особенностей и ограничений.

В результате сравнительного анализа различных методов дозиметрии с точки зрения применимости в медицине, предпочтительным является метод ТЛД, позволяющий решать широкий спектр задач клинической дозиметрии.

Литература

1. Podgorsak, E.B. Radiation oncology physics [Text]: a handbook for teachers and students / E.B. Podgorsak. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005. – 657 p.
2. Кондричина, С.Н. Основы лучевой терапии [Текст]: учебное пособие / С.Н. Кондричина, А.Т. Балашов. – ПетрГУ. Петрозаводск, 2001. – 44 с.
3. Иванов, В.И. Курс дозиметрии [Текст]: учебник для вузов / В.И. Иванов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: Атомиздат, 1978. – 392 с.
4. Bos, A.J.J. On the energy conversion in thermoluminescence dosimetry materials [Text] / A.J.J. Bos // Radiation Measurements 33. – 2001. – P. 737–744.