

Симпозиум по биофизическим аспектам качества излучения

Симпозиум, организованный Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) при содействии Австралийской атомной комиссии, состоялся в марте 1971 г. в Лукас-Хайтсе (Австралия). В работе симпозиума приняли участие 67 специалистов от 16 стран и двух международных организаций (ВОЗ и Международной комиссии по радиационной защите).

Основное научное содержание симпозиума — сопоставление биологического действия излучения на клеточном и молекулярном уровнях с качественными характеристиками излучения. С понятием «качество излучения» связывают обычно линейную передачу энергии (ЛПЭ) заряженных частиц, входящих в состав первичного излучения или возникающих в биологической ткани под действием нейтронного или γ -излучения. Распределение макроскопических величин ЛПЭ есть одна из качественных характеристик излучения, принятая в обычной дозиметрии (макродозиметрии). При рассмотрении радиационных эффектов на клеточном и молекулярном уровнях приходится оценивать передачу энергии излучения столь малым объемам вещества (линейные размеры порядка 10—100 Å), что существенными становятся флуктуации переданной энергии. В этих условиях качественные характеристики излучения, выраженные в макроскопических величинах, оказываются непригодными, а само понятие «качество излучения» становится менее определенным; возникает необходимость использовать микродозиметрические величины «размер события» Y и «локальная плотность поглощенной энергии» Z . Качественной характеристикой излучения может служить распределение макроскопической величины дозы по макроскопическим величинам Y и Z . Эти вопросы явились предметом дискуссий на симпозиуме.

Некоторые участники симпозиума считали, что понятие «качество излучения» должно включать в себя характеристику непосредственно излучения, свойств среды, с которой излучение взаимодействует, а также наблюдаемый радиационный эффект.

Интересный подход в оценке значения качества излучения для целей радиационной защиты дан в докладе Д. Тарнера (США). Дополнительно к величине поглощенной энергии, ЛПЭ и величине флуктуаций энергетических потерь он предлагает учитывать другие физические величины, характеризующие взаимодействие излучений с веществом и пригодные для описания радиационных эффектов. В качестве примера рассмотрено поперечное сечение для характерных видов событий в атомной области и установлена связь между величиной сечения и относительной биологической эффективностью (ОБЭ) для одного частного случая. Основываясь на более ранних работах, автор считает полезным использовать величину количества движения, передаваемого излучением облучаемой среде.

Попытки связать значения ОБЭ в аналитической форме с физическими величинами, характеризующими первичные акты взаимодействия излучения с веществом, сделаны в других докладах. Р. Катц (США) рассмотрел формальную аналогию между физическими процессами, ответственными за поражение биологической клетки, и процессами, наблюдаемыми в облученных фотозмульсиях. Рассмотрев структуру треков, наблюдаемую в эмульсиях, и сопоставив зерно эмульсии с центрами

поражения биологической клетки, автор предложил формулу выживаемости для одноударного или многоударного механизма поражения, удовлетворительно согласующуюся с некоторыми экспериментами.

Некоторые авторы, рассматривая радиобиологическое действие на клеточном уровне, исходили из того, что гибель клетки обусловлена двумя независимыми реакциями, одна из которых связана с одноударным, другая — с многоударным механизмом поражения. Со второй реакцией могут быть связаны и эффекты непрямого действия, такие, как, например, кислородный эффект. Видероу (Швейцария) предположил, что ответственным за первый тип поражения (одноударный механизм) является часть энергетического спектра излучения с высокими значениями ЛПЭ, а за второй тип — с низким значением ЛПЭ. В результате удалось получить формулу, описывающую радиобиологический эффект в зависимости от дозы излучения и безразмерных параметров, один из которых, названный автором «качеством» излучения, определяется средним значением ЛПЭ заряженных частиц. Подбирая соответствующие значения параметров, удалось согласовать теоретическую оценку радиобиологического эффекта в зависимости от «качества» излучения с многочисленными экспериментальными данными.

Вопросам микродозиметрии было посвящено значительное число докладов. Симпозиум был открыт обзорным докладом В. И. Иванова (СССР) «Систематика задач дозиметрии ионизирующих излучений и значение микродозиметрии», в котором показана возможность систематизации задач дозиметрии на строгих физических принципах, а микродозиметрия рассматривается как раздел дозиметрии, наиболее полно описывающий физические процессы, лежащие в основе радиационных эффектов. В двух других советских докладах (Н. П. Калашников, В. С. Ремизович, М. Н. Рязанов) рассмотрены флуктуации функции распределения потерь энергии в заданном объеме, а также распределение вероятности для энергии, переданной ионизирующим излучением микрообъему вещества.

Получение микродозиметрических данных и экспериментальная оценка качества излучения основаны на измерениях с пропорциональными счетчиками, которые все еще составляют основную экспериментальную технику в микродозиметрии. Детальный анализ применения тканезквивалентных пропорциональных счетчиков дан в докладе П. Н. Белоногого и др. (СССР). Моделирование тканевых микрообъемов с помощью полости, наполненной тканезквивалентным газом, ограничено, однако, влиянием границ, разделяющих области среды разной плотности (газ — стенка); поэтому идеальным был бы бесстеночный счетчик. А. Келлерер (США) дал полезный анализ стеночного эффекта при микродозиметрических измерениях.

Современная дозиметрия рассматривает процессы передачи энергии излучения микроструктурам вещества с линейными размерами порядка 10^{-6} м. Х. Росси (США) поставил вопрос о развитии микродозиметрии в области $\sim 10^{-9}$ м. Он выступил с докладом, излагающим подходы к теории двойного лучевого поражения. В основу положены следующие предположки, выведенные из экспериментальных данных: 1) одиночная частица с высоким значением ЛПЭ, проходящая через ядро клетки, поражает биологическую клетку; 2) с уменьшением ЛПЭ

вероятность поражения одной частицей уменьшается и становится близкой к нулю при минимальных значениях ЛПЭ; 3) различные внешние факторы (кислород, влага) не существенны при больших значениях ЛПЭ и существенны для низких значений ЛПЭ; 4) для поражения клетки млекопитающих требуется передача энергии более чем одной чувствительной области в пределах ядра клетки; 5) зависимость ОБЭ от дозы указывает, что радиобиологический эффект излучений низким значением ЛПЭ в клетках высших организмов обусловлен действием двух заряженных частиц (обычно электронов). Анализируя микрораспределение первичных актов ионизации для α -частиц и фотонного излучения, сравнивая их ОБЭ из данных радиобиологического эксперимента с учетом указанных предпосылок, автор приходит к следующим выводам:

1. Радиационное повреждение клеток высших организмов обусловлено поражением двух чувствительных микроструктур (локусов);

2. Функциональное взаимодействие «локусов», существенно влияющее на поражение клетки, происходит на расстояниях, сравнимых с диаметром ее ядра;

3. Локусы занимают объем, приблизительно равный 10^{-3} объема ядра клетки, имеют диаметры порядка 1–10 нм; в ядре имеется от 10^6 до 10^7 «локусов»;

4. «Локусы» могут поражаться одним актом первичной ионизации, однако эффективность поражения повышается, когда расстояние между первичными актами ионизации становится меньше, чем средний пробег дельта-частиц.

Участники симпозиума высказались за продолжение теоретических исследований в этой области и указали на необходимость развития техники микродозиметрии в области $\sim 10^{-9}$ м. С докладом о применении концепций микродозиметрии для анализа соотношений доза — эффект выступил Н. Ода (Япония).

В нескольких докладах рассмотрены чисто биологические аспекты действия излучений. Среди них обзорный доклад Т. Алпер (Великобритания) о роли первич-

ного повреждения в мембранах и ДНК, два доклада Н. Брауна (Австралия) о воздействии ионизирующего (рентгеновское) и неионизирующего (ультрафиолетовое) излучений и др. Интересен объединенный доклад ученых из ФРГ и США (Л. Файннедеген, Х. Эртл и В. Бонд), в котором рассмотрено увеличение ОБЭ, обусловленное оже-эффектом, на примере изотопа ^{125}I , связанного с ДНК в размножающихся клетках мышц. Авторы сопоставили биологическое действие ^{125}I с биологическим действием трития, находящегося в аналогичных условиях. Принимая ОБЭ для трития равным 1, авторы нашли, что экспериментальное значение ОБЭ для ^{125}I в пять раз выше того значения, которое следует из сопоставления поглощенных доз. Согласно схеме распада, изотоп ^{125}I путем электронного захвата превращается в метастабильный изотоп ^{125m}Te , который при переходе в стабильное состояние испускает оже-электроны (6 электронов на распад); при этом образуются атомы с сильным положительным зарядом. Согласно гипотезе авторов, атомы изотопа ^{125}I , инкорпорированные в клетках, создают в результате распада стабильные положительно заряженные атомы, которые затем нейтрализуются за счет присоединения электронов от соседних молекул; это приводит к образованию распределенного положительного электричества, которое в результате действия сил электростатического отталкивания разрушает клетку. Этим объясняется увеличение ОБЭ.

Несколько необычных результатов было представлено в докладе Г. Кюнцеля и Ф. Зиветца (ФРГ) по исследованию ОБЭ тормозного излучения высокой энергии (7 ГэВ) на разных глубинах водного фантома. В то время как на передней поверхности фантома ОБЭ оказалась равной 0,7, она возрастала с глубиной и принимала значения более двух в области максимума глубинной дозы. Это явление авторы связали с возможным образованием нейтронов и тяжелых заряженных частиц в результате ядерных реакций под действием высокоэнергетических фотонов.

В. И. ИВАНОВ

Советские специалисты по реакторному материаловедению в Канаде

С 16 по 26 ноября 1970 г. в Канаде находилась делегация специалистов по реакторному материаловедению в составе А. Д. Амаева (глава делегации), И. С. Лупанова, Б. М. Найденова, А. В. Никулиной и В. А. Якименко с целью ознакомления с работами, проводимыми в организациях Комиссии по атомной энергии Канады (AECL).

Делегация посетила научно-исследовательские центры в Чок-Ривере и Уайтшелле, Проектный институт по созданию АЭС (вблизи г. Торонто), завод по переработке циркониевого сырья в трубные заготовки (г. Порт-Хоп), предприятия канадской фирмы «Вестингауз» по изготовлению твэлов и других изделий (г. Порт-Хоп и г. Гамильтон), сооружаемую в г. Пикеринге АЭС с четырьмя блоками по 500 Мвт (эл.), опытную АЭС NPD, а также инженерный факультет Монитобского университета.

За время пребывания в Канаде члены делегации встречались с известными учеными и ведущими специалистами: Люисом, Хейвудом, Мурадяном, Фостером, Перриманом, Поном, Робертсоном, Коксом, Лесерфом и др.

Как известно, канадские АЭС базируются на тяжеловодных реакторах канального типа. К таким реакторам относятся реактор CANDU (г. Дуглас-Пойнте) на 200 Мвт (эл.) и реакторы Пикерингской АЭС на 2000 Мвт (эл.). Разрабатываются реакторы аналогичного типа, но с вертикально расположенными каналами, в которых теплоносителем служит не тяжелая, а обычная кипящая вода, так называемые реакторы CANDU — BLW. Представителем этого поколения АЭС является АЭС в Джентилли на 250 Мвт (эл.), которая недавно вступила в строй*, а также АЭС в Брюсе с четырьмя реакторами по 750 Мвт (эл.), которую намерено ввести в строй в 1976–1980 гг.

В настоящее время в качестве ядерного горючего для реакторов CANDU и CANDU — BLW используются таблетки из спеченной UO_2 , а для каналов под давлением и оболочек твэлов — циркониевые сплавы (таблица).

* Реактор этой АЭС впервые доведен до критического состояния 12 октября 1970 г. — Прим. ред.