

В докладах, посвященных токсикологии, основное внимание было уделено изучению особенностей поведения и биологического действия радона, его дочерних продуктов и урана. Большой интерес вызвал доклад В. С. Кушневой (СССР), в котором экспериментами на крысах показано существенное влияние радона с его дочерними продуктами на течение силикотического процесса. При обсуждении докладов всеми был отмечен недостаточный объем проводившихся до настоящего времени в различных странах токсикологических исследований, особенно по проблемам комбинированного воздействия радиационных и нерадиационных факторов.

В нескольких докладах были подвергнуты обсуждению результаты изучения радиационной обстановки

на территориях, прилегающих к предприятиям урановой промышленности, а также условия безопасного хранения пуль и хвостов после переработки урановых руд. Опасность могут представлять радий и уран, если не исключено попадание их из пульпохранилищ и хвостохранилищ в используемые водоемы. По утверждениям докладчиков путем постоянного контроля за сбросами, а также осуществлением инженерных мероприятий по локализации хранилищ и очистке сбросов во всех странах обеспечивается радиационная безопасность населения, проживающего в районе расположения урановых рудников и заводов.

М. Баширцев, Н. Чесноков

Симпозиум по биологическому действию нейтронов

В октябре 1963 г. в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) проходил организованный МАГАТЭ Международный симпозиум по биологическому действию нейтронов. В работе симпозиума приняли участие 150 ученых из 18 стран, в том числе из Великобритании, Индии, Италии, Канады, СССР, США, Франции, ФРГ, Чехословакии, Швеции и Японии. Всего было заслушано и обсуждено 52 доклада, в том числе три обзорных. Они были посвящены дозиметрии нейтронов и протонов высоких энергий (как известно, биологическое действие быстрых нейтронов обусловлено преимущественно образованием протонов отдачи в ткани), клеточным и генетическим эффектам, относительной биологической эффективностью (ОБЭ) этих видов излучения, а также анализу ранних и поздних реакций организма на лучевое воздействие. В обзорных докладах были проанализированы итоги разносторонних научных исследований по биологическому действию нейтронов и протонов высоких энергий на животных (Ю. И. Москалев, СССР), по применению нейтронного облучения в сельском хозяйстве и прикладной генетике (А. Гопал-Анггер и М. Суоминатан, Индия), по использованию быстрых и медленных нейтронов, а также тяжелых частиц в радиотерапии (Дж. Фаулер, Великобритания).

Практически в каждом докладе большое внимание было уделено описанию техники облучения биологических объектов и характеристике источников облучения, наиболее распространенными из которых в настоящее время являются ядерные реакторы, циклотроны и ускорители Ван де Граафа. Специальными мерами удается создавать относительно «чистые» пучки данного вида излучения. Например, на реакторе ВЕРО (Великобритания, Харуэлл) мощностью 6 Мвт размещение конвертора из ^{235}U и свинцового фильтра в потоке тепловых нейтронов из тепловой колонны позволило получить мощность дозы нейтронов деления около 2500 рад/ч при мощности дозы сопровождающего γ -излучения 300 рад/ч. Свинцово-кадмиевый фильтр создавал мощность дозы γ -излучения в месте размещения животных, равную 1850 рад/ч при практически полном отсутствии нейтронов. В Аргоннской национальной лаборатории (США) для получения моноэнергетических нейтронов при облучении мышей использовали ускоритель Ван де Граафа на 3,5 Мэв, работающий на реакции $\text{Li}^7(p, n)\text{Be}^2$ с максимальным током ускоренных протонов $180 \text{ мкА} \pm 0,1\%$. Изменение энергии ускоренных протонов в диапазоне 1882—3500 кэв получали монохроматические нейтроны в диапазоне 25—1815 кэв при мощности дозы от 0,05 до 3 рад/сек

в объеме около 0,4 л с примесью γ -излучения менее 0,5% по дозе. Опыты с протонами высоких энергий проводятся в Орсе (Франция) на синхротроне (протоны с энергиями 157 Мэв) и на синхротроне ЦЕРНА (протоны с энергиями 600 Мэв). Кроме того, используется линейный ускоритель для облучения электронами с энергией 950 Мэв.

В докладах В. П. Афанасьева и др. (СССР), К. А. Тобайса и др. (США) были приведены данные экспериментальных и теоретических исследований по созданию дозных полей протонов высоких энергий. В обоих случаях для расширения пучка и создания равномерного и достаточно большого (по сравнению с размерами облучаемого животного) дозного поля обосновано использование поглотителей. В работе советских ученых, выполненной на синхротроне ОИЯИ, в качестве поглощающих материалов применены свинец и полиэтилен, в работе американских исследователей предложены наборы свинцовых, медных, алюминиевых и графитовых поглотителей, создающих равномерное поле облучения диаметром 30 см.

В методическом отношении интересна работа Д. Хайтауэра и Х. Шварца (США), в которой предложен экспериментальный метод определения глубинного распределения нейтронов по активности Na^{24} в срезах замороженного трупа подопытного животного.

Доклады Х. Шефера (США) и В. Снайдера (США) содержали вычисления распределения глубинных доз по спектру линейной плотности потерь энергии (ЛПЭ). В первом из них распределение дозы по ЛПЭ рассчитано для протонов солнечных вспышек (главного радиационно опасного фактора околоземного пространства) на различных глубинах тканезквивалентного фантома. Х. Шефер получил любопытный результат: протоны солнечной вспышки и рентгеновское излучение с пиковым напряжением 220 кэв, принимаемое в радиобиологии за стандартное, дают приблизительно одинаковое распределение поглощенной дозы по ЛПЭ. В. Снайдер методом Монте-Карло рассчитал распределение поглощенных доз в тканезквивалентных фантомах цилиндрической формы, имитирующих мышь, крысу, морскую свинку, собаку и человека, для моноэнергетических нейтронов в диапазоне энергий до 20 Мэв и для спектра деления.

Основное количество докладов, обсужденных на симпозиуме, содержало результаты измерений ОБЭ нейтронов и протонов в зависимости от дозы, ритма воздействия, энергии излучения и вида животных. П. Бонэ-Мари (Франция), изучая ОБЭ протонов (157—592 Мэв) и электронов (150—950 Мэв) в сопоставлении с рентге-

новским излучением, не выявил никакого специфического действия исследуемых излучений и по ряду тестов нашел ОБЭ протонов, лежащими в диапазоне 0,77—1,03, а электронов — в диапазоне 0,74—0,87. В работе советских исследователей Ю. Г. Григорьева и др. ОБЭ протонов высоких энергий (126, 240 и 510 Мэв) было изучено не только для мелких лабораторных животных (мыши, крысы), но и для крупных (собаки) в условиях как однократного, так и дробного облучения. Установлено, что ОБЭ высокоэнергичных нейтронов по критерию дозы 50%-ной смертности в 30-дневный срок ($LD_{50/30}$) для мышей и крыс имеет величину менее единицы (0,75; 0,73 и 0,80), в то время как для собак она равна 1,00—1,15.

С целью имитации действия протонов солнечных вспышек Ашикава и др. (США) изучили в опытах на мышках эффективность протонов с энергиями 730 Мэв в зависимости от мощности дозы (100 и 1000 рад/мин). Авторы не обнаружили различий в уровнях $LD_{50/30}$ (650 рад), но выявили отчетливые различия в динамике вымирания крыс. Увеличение мощности дозы до 1000 рад/мин ускоряет наступление смерти от кишечного синдрома по сравнению со 100 рад/мин. Кроме того, при сопоставлении с рентгеновским излучением обнаружено, что при протонном облучении пик смертности был выражен на четвертые — шестые сутки, в то время как при воздействии рентгеновскими лучами — на двенадцатые — четырнадцатые сутки, что, видимо, связано с различными механизмами действия этих излучений (кишечный синдром и поражение кровеносной ткани) из-за особенностей распределения поглощенной дозы. В случае протонов высоких энергий доза в обоих органах равномерна и сравнима и имеет постоянное отношение к воздушной дозе. При облучении рентгеновскими лучами локальная доза в подостях костного мозга может в несколько раз превосходить воздушную, тогда как в мягких тканях (в кишечнике), наоборот, с глубиной уменьшается. Упомянутые эксперименты свидетельствуют, что величины ОБЭ могут отличаться в группе разных видов излучений с одинаковой ЛПЭ в тех случаях, когда имеются различия в мощности дозы и микрогеометрии распределения поглощенной дозы.

В докладе Ю. И. Москалева и др. (СССР) были представлены данные о действии различных доз протонов (500 Мэв) и быстрых нейтронов (2 Мэв) на продолжительность жизни, периферическую кровь, частоту и скорость возникновения опухолей различных тканей у самцов и самок белых крыс. Показано, что LD_{50} протонов и нейтронов, вызывающих гибель 50% животных за 15, 30, 60 и 120 суток, практически одинаковы. После облучения быстрыми нейтронами более частое возникновение лейкозов и опухолей щитовидной железы обнаружено при воздействии дозами 42,5 рад и более, а в случае протонов — 250 рад.

Сообщение Арно (Франция), изучавшего в сравнительном эксперименте влияние рентгеновского и γ -излучений и быстрых нейтронов на выживаемость и возникновение мутаций у кишечной палочки и дрожжей, содержало важные данные о сложном характере сравнительной эффективности ионизирующих излучений. Так, для кишечной палочки при воздействии дозами до $5 \cdot 10^3$ рад нейтроны обладают такой же эффективностью, что и рентгеновские лучи по критерию выживаемости, и кривая доза — эффект имеет линейный характер. При более высоких уровнях доз (до $4 \cdot 10^4$ рад) нейтроны оказываются значительно менее эффективными и кривая доза — эффект не имеет линейного

характера. Подобные неоднозначные выводы получены и при других критериях. Они означают, что эквивалентные дозы уже не определяются линейным уравнением и предложенный недавно фактор качества (аналог ОБЭ) не соответствует ни физической, ни биологической реальности.

Брорзе и Барендсен (Нидерланды), изучавшие действие моноэнергетических нейтронов на клетки почки человека в условиях тканевой культуры, также установили факты фундаментальной важности. Оказалось, что ОБЭ нейтронов падает с понижением дозы выживающих клеток, т. е. с увеличением дозы. Так, при облучении нейтронами с энергией 3 Мэв при 80%-ном выживании, ОБЭ равно 6,5; при 20% — 4,4; 5% — 3,6; 1% — 3,1. В случае протонов с энергией 15 Мэв ОБЭ также падает с увеличением дозы с 1,9 (80%-ное выживание) до 1,6 (20%). ОБЭ нейтронов с энергией 15 Мэв равна ОБЭ моноэнергетических α -частиц с ЛПЭ 20 кэв/мк ткани, для нейтронов с энергией 3 Мэв — 85 кэв/мк ткани. Таким образом, невозможно предсказать действие определенной дозы излучения на основе вычислений среднего значения ЛПЭ без знания глубокого его распределения, особенно у крупных животных.

Эндрюс и Корри (США) обнаружили на клетках млекопитающих, что при воздействии излучения с малой плотностью ионизации (γ -излучение Co^{60} , ЛПЭ = 0,5 кэв/мк) насыщение ткани кислородом приводит к двукратному увеличению чувствительности клеток в сравнении с аноксическим состоянием, в то время как кислородный эффект почти не сказывается при облучении с высокой плотностью ионизации (быстрые нейтроны с энергией 14 Мэв, ЛПЭ = 20 кэв/мк и нейтроны деления с ЛПЭ = 50 кэв/мк).

В работе Эйнсворта и др. (США) сравнивалось воздействие (по $LD_{50/30}$) нейтронов на мышей и собак при резко различных мощностях доз 20—100 рад/мин и $(2-10) \cdot 10^5$ рад/мин. Крайне интересно, что $LD_{50/30}$ в обоих случаях оказались близкими друг к другу; не было обнаружено также различий в скорости восстановления в зависимости от мощности дозы. В таком же эксперименте на мышках Спалдинг и Сайер (США) установили, что величина $LD_{30/50}$ для нейтронов деления при мощности дозы $2 \cdot 10^8$ рад/мин оказалась равной $193 \pm 9,7$ рад, а при мощности дозы 10—14 рад/мин — $204 \pm 2,7$ рад, тогда как γ -излучение Co^{60} при мощности дозы 9 рад/мин дало 739 ± 19 рад. Сопоставив свою работу с исследованием Сторера, применявшего еще меньшие мощности дозы, авторы сделали заключение о независимости эффекта действия нейтронов при облучении с мощностями доз от 0,15 до $2 \cdot 10^8$ рад/мин.

Кребс и Брауэр (США), экспериментально изучив вопросы восстановления после рентгеновского, γ - и нейтронного облучения, пришли к заключению, что известное увеличение ОБЭ нейтронов в условиях хронического (более 5 месяцев) облучения обусловлено лучшим восстановлением лучевых повреждений после воздействия установлением лучевых повреждений после воздействия γ -и рентгеновского излучений.

Бетман, Бонд и Росси (США) установили, что катарактогенное действие ионизирующих излучений зависит от вида животного; наиболее чувствительны хрусталики мышей, наименее чувствительны — у человека. Нейтроны примерно в 10 раз эффективнее, чем рентгеновское излучение, а нейтроны с энергией 0,43 Мэв немного эффективнее нейтронов с энергиями 1,8 Мэв. Доза в 1 рад нейтронов вызывает определенное помутнение хрусталика, однако отсутствуют данные о том,

становится ли оно стационарным. По мнению авторов этого доклада, в силу большей чувствительности мышей в сравнении с человеком к катарактогенному действию нейтронов начальные лучевые помутнения хрусталика

даже в случае отсутствия порога их возникновения никогда не могут прогрессировать без регулярных повторных облучений и вызывать измеримую потерю зрения.

Ю. Т.

Индийский научный атомный центр в Тромбее

Во время поездки в Индию для участия в 50-й сессии Индийского научного конгресса (октябрь 1963 г.) автор этой статьи посетил Индийский государственный научный атомный центр в Тромбее, находящийся в северном предместье Бомбея.

Центр занимает территорию более 300 га на берегу Бомбейского залива. Его научный, инженерно-технический, производственный и административный штат составляет около 4000 человек. Директором центра является видный индийский ученый-атомник доктор Х. Баба.

В Тромбее два исследовательских реактора: «Ансара» («Русалка») и «CIR» — канадско-индийский реактор. Первый реактор мощностью 1 Мвт построен по проекту индийских ученых в 1957 г. В качестве горючего в нем используется обогащенный до ~50% уран; охлаждение реактора и замедление нейтронов производится обычной очищенной водой, отражатель состоит из графита и окиси бериллия; поток тепловых нейтронов составляет $1 \cdot 10^{11}$ — $3 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек. Каналы реактора имеют диаметр от 10 до 24 см. В одном из каналов смонтирована электрическая печь с нагревателем (графитовая труба). На реакторе изучается радиационная стойкость органических теплоносителей (в частности, терфенила) при температуре до 400° С.

Второй реактор — тяжеловодный, поставлен Индией Канадой и смонтирован при участии индийских специалистов. Он вступил в строй в 1960 г. и работает на природном металлическом уране, общая загрузка которого составляет 15 т. Для охлаждения реактора применяется обычная, очищенная вода. В настоящее время рабочая мощность реактора достигает 40 Мвт, а поток нейтронов — $6,5 \cdot 10^{13}$ нейтр/см²·сек.

Первая загрузка твэлов была поставлена Канадой. В настоящее время твэлы изготавливаются в Индии, для чего построен небольшой специальный завод. Индийские ученые и инженеры подчеркивали, что ими разработана оригинальная технология изготовления твэлов, «живучесть» которых выше, чем у канадских.

Индийские твэлы имеют диаметр уранового стержня 3,49 см. Их оболочка сделана из алюминия марки 2S толщиной 0,1 мм. Оболочка имеет три выступа, расположенные под углом 120°. Твэлы помещены в алюминиевую трубу с внутренним диаметром 4,2 см. В кольцевом зазоре между твэлом и трубой проходит охлаждающая вода. Вторая, алюминиевая труба более широкая с наружным диаметром 5,7 см, толщиной стенки 1,6 мм окружает внутреннюю. В зазоре между двумя алюминиевыми трубами — прослойка воздуха. Общая длина твэлов ~10 м, а активная часть в них составляет около 3 м.

Охлаждающая вода подвергается деаэрации и ионной очистке. Ввиду трудностей получения на месте больших количеств очищенной воды применяется замкнутая система ее циркуляции, и выходящая из реактора горячая вода охлаждается в теплообменнике морской водой.

Реактор «CIR» служит для производства радиоактивных изотопов. Кроме того, на нем проводятся физиче-

ские исследования. Реактор оборудован хранилищем для отработавших урановых блоков, горячей камерой для разделки высокоактивных материалов, системой санитарно-душевого обслуживания персонала и т. д. Блоки с отрезанной урановой частью транспортируются в хранилище в горизонтальном состоянии по довольно длинному бетонному каналу, заполненному водой. Хранятся блоки также в горизонтальном положении. При реакторе имеется специальная ионообменная установка для очистки воды, а также емкость с аварийным запасом очищенной воды.

В отдельных зданиях находятся две радиохимические лаборатории — производственная и исследовательская. Производственная лаборатория выпускает препараты 40 радиоактивных изотопов. Изготавливается более 50 наименований различных органических соединений, меченных C^{14} . Предполагается организовать выпуск еще 125 органических соединений, содержащих этот изотоп углерода.

Исследовательская радиохимическая лаборатория состоит из отделения плутония и отделения осколочных элементов. В отделении плутония проводится работа с граммовыми количествами этого элемента. Изучается химия плутония, определяется давление пара его галогенидов. В отделении осколочных элементов исследуются методы их анализа и разрабатываются детали экстракционного способа разделения осколочных элементов, урана и плутония с использованием трибутилфосфата.

В настоящее время в Тромбее заканчивается строительство установки для извлечения плутония из отработавшего горючего. Алюминиевая оболочка будет растворяться в щелочи. В основу технологического метода разделения урана, плутония и осколочных элементов положена экстракция с помощью трибутилфосфата. Конструкция экстракционных колонн и проект всего здания выполнены индийскими инженерами. Извлекаемый плутоний предполагается использовать в сплаве с ураном для изготовления новых твэлов.

Очень большая научно-исследовательская работа проводится химическим отделом атомного центра (руководитель д-р Дж. Шанкар). В настоящее время лаборатории этого отдела расположены непосредственно в Бомбее. Место строительства специального здания для химического отдела на основной территории атомного центра в Тромбее уже определено.

Химический отдел проводит широкие исследования по химии и технологии урана, тория, редких земель, тантала, ниобия и других элементов, применяемых в атомной промышленности. В отделе работает около 300 научных сотрудников и инженеров. Обращает на себя внимание тесная связь тематики отдела с запросами практики. Имеется несколько установок полупроизводственного характера, на которых проверяются технологические методы, разработанные в лабораторных условиях, и выпускается в небольших количествах готовая продукция.

Представляет интерес установка для получения губчатого циркония производительностью до 1 кг/день.