

## Изучение дозных полей клинического протонного пучка с помощью радиодефекционного трекового детектора

М. Ф. ЛОМАНОВ, Г. Г. ШИМЧУК, Р. М. ЯКОВЛЕВ

УДК 621.039.8:539.12.04

При дозиметрии клинического пучка протонов возникают задачи, для решения которых необходимо охватить чрезвычайно широкий диапазон доз. Протонные пучки позволяют сосредоточить дозу в заданном резко ограниченном объеме. При этом необходимо знать дозу, поглощаемую органами, не относящимися к патологическому очагу. Эта доза, даже если она составляет 0,1% поглощенной дозы в очаге, должна быть известна. Однако измерения в этом диапазоне сложны из-за перехода от протонного облучения к смешанному, связанному с появлением нейтронов, особенно у краев пучка.

Для измерения дозного распределения протонов при мощности дозы порядка 1000 рад/сек используются ионизационные камеры, полупроводниковые детекторы, ядерные эмульсии, фотопленки и пр. Для применения узкого пучка протонов для нанесения локального лучевого повреждения, заменяющего хирургическую операцию на мозге, требуются детекторы с хорошим пространственным разрешением. В некоторых случаях мощность дозы чрезвычайно высока; так, на импульсном пучке протонного синхротрона ИТЭФ она достигает 1000 рад в импульсах длительностью 1,6 мксек, повторяющихся каждые 4 сек. В связи с этим возникает необходимость в разработке специальных методов измерения.

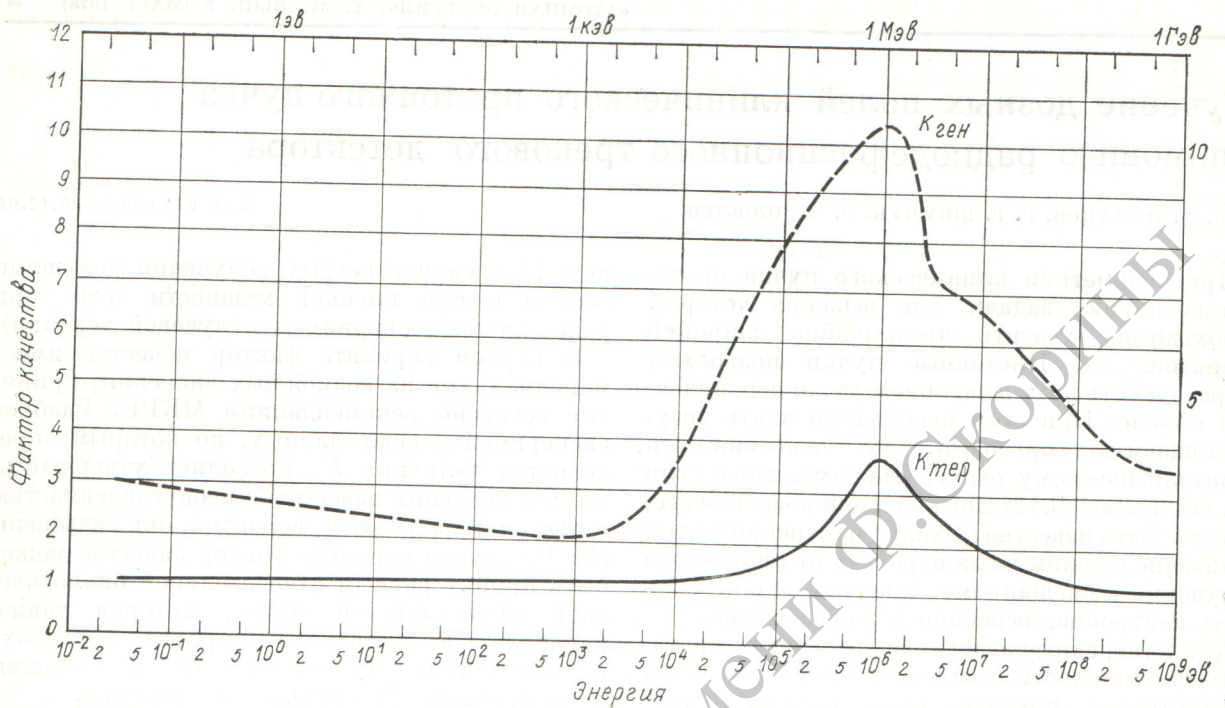
При измерениях непосредственно в пучке обычно используются приборами, показывающими поглощенную дозу, так как биологическое действие протонов высокой энергии и стандартного рентгеновского излучения (220 кэв) приблизительно одинаково. При измерении же смешанного излучения необходимо учитывать различия в биологическом действии в зависимости от качества излучения. В диапазоне измерения доз, достигающем шести порядков, критерии эквивалентности между физической и биологической дозами неизбежно должны меняться. Поэтому воспользуемся предложением Прэтра [1] рассматривать фактор (коэффициент) качества  $K$  на двух принципиально различных уровнях: 1) в случае хронического облучения при низких значениях дозы и ее мощности, когда наиболее важны генетические нарушения и повреждения критических орга-

нов; 2) в случае острых облучений большими дозами и при высокой мощности дозы (при радиационных авариях и в лучевой терапии).

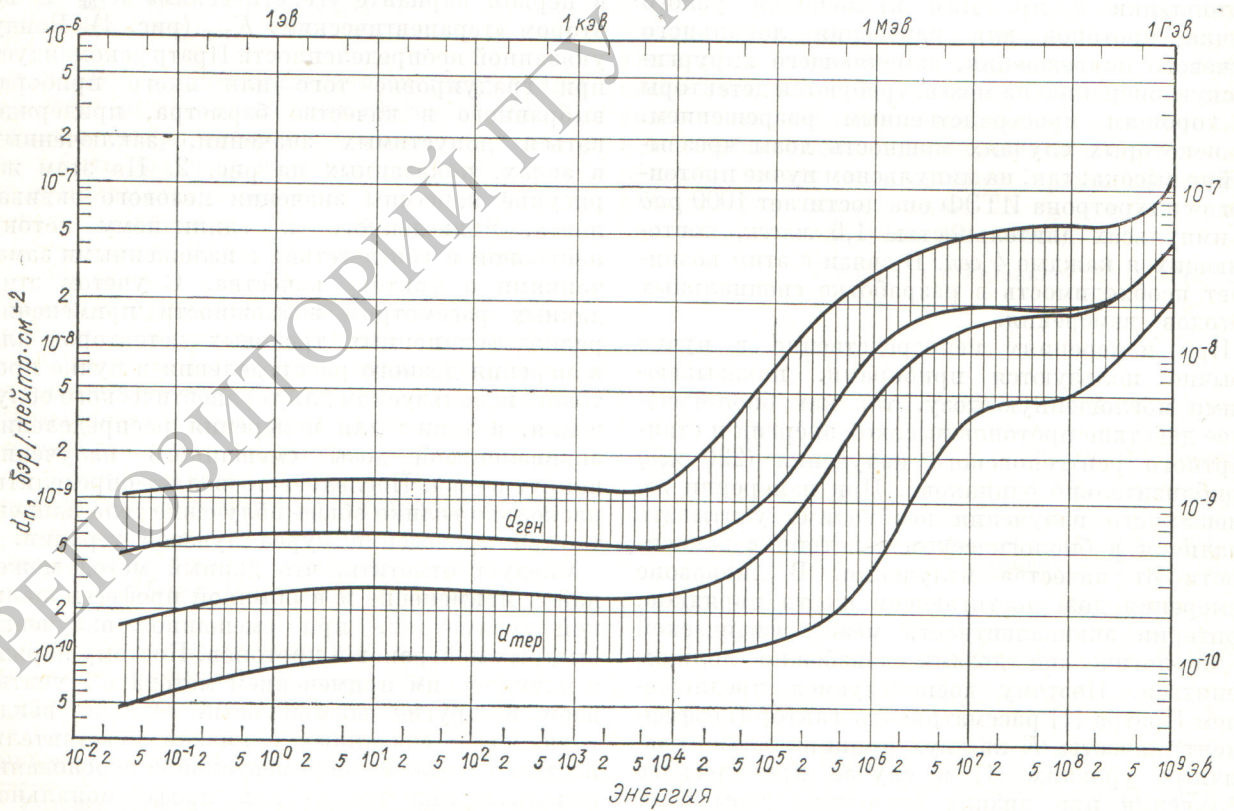
В первом варианте фактор качества имеет максимальные из возможных значения, принятые согласно рекомендациям МКРЕ. Разброс экспериментальных данных, по которым определяется величина  $K$ , позволяет утверждать, что эти значения известны с неопределенностью в два—четыре раза, и, вероятно, они завышены [1]. Во втором варианте фактор качества может быть принят равным относительной биологической эффективности (ОБЭ), которая также варьирует в достаточно широких пределах, в зависимости от условий ее определения и выбранной биологической реакции.

Для краткости назовем фактор качества в первом варианте «генетическим»  $K_{ген}$  и во втором «терапевтическим»  $K_{тер}$  (рис. 1). Ввиду указанной неопределенности Прэтр рекомендует при градуировке того или иного прибора, выбранного в качестве барметра, придерживаться допустимых значений, заключенных в зонах, показанных на рис. 2. На этом же рисунке нанесены значения дозового эквивалента, приведенного к единичному потоку нейтронов в соответствии с изложенными замечаниями о факторе качества. С учетом этих данных рассмотрим возможности применения радиодефекционных трековых детекторов для измерения дозного распределения в пучке протонов, используемом для терапевтического облучения, а также для измерения распределения эквивалентной дозы смешанного излучения вокруг пучка. Последнее позволяет определить, насколько велико общее облучение тела пациента при проведении курса лучевой терапии.

Следует отметить, что данный метод может найти применение и в обычной профессиональной дозиметрии, при смешанном излучении быстрых нейтронов и протонов. Поэтому наряду с клиническим применением метода мы учитываем и другие возможности. Однако ввиду трудностей, связанных с низкой чувствительностью метода, экспериментальное обоснование использования метода для профессиональной дозиметрии в настоящей работе не рассматривалось.



Р и с. 1. Факторы качества  $K_{ген}$  и  $K_{тер}$  для нейтронов [1].



Р и с. 2. Зоны значений дозовых эквивалентов для нейтронов.

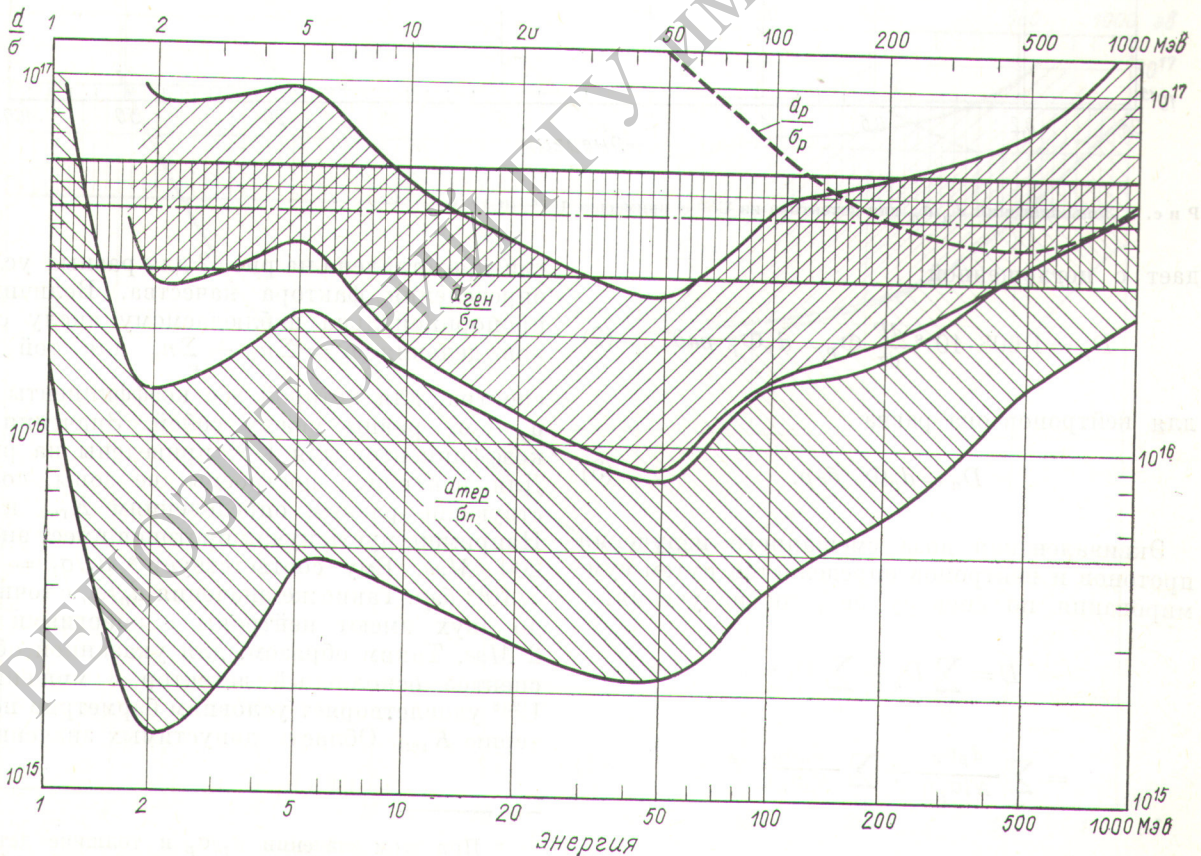
### Использование радиодефекционных трековых детекторов для бэрметрии протонов и сопутствующих им излучений

Радиодефекционные трековые детекторы регистрируют поток частиц по осколкам деления тяжелых ядер (U, Th, Bi, Pu, Np и пр.). Выбитые из мишени осколки деления оставляют следы повреждений в подложке из стекла, слюды или лавсана. После травления (например, стекла в 3%-ной плавиковой кислоте) эти следы можно наблюдать под микроскопом [2].

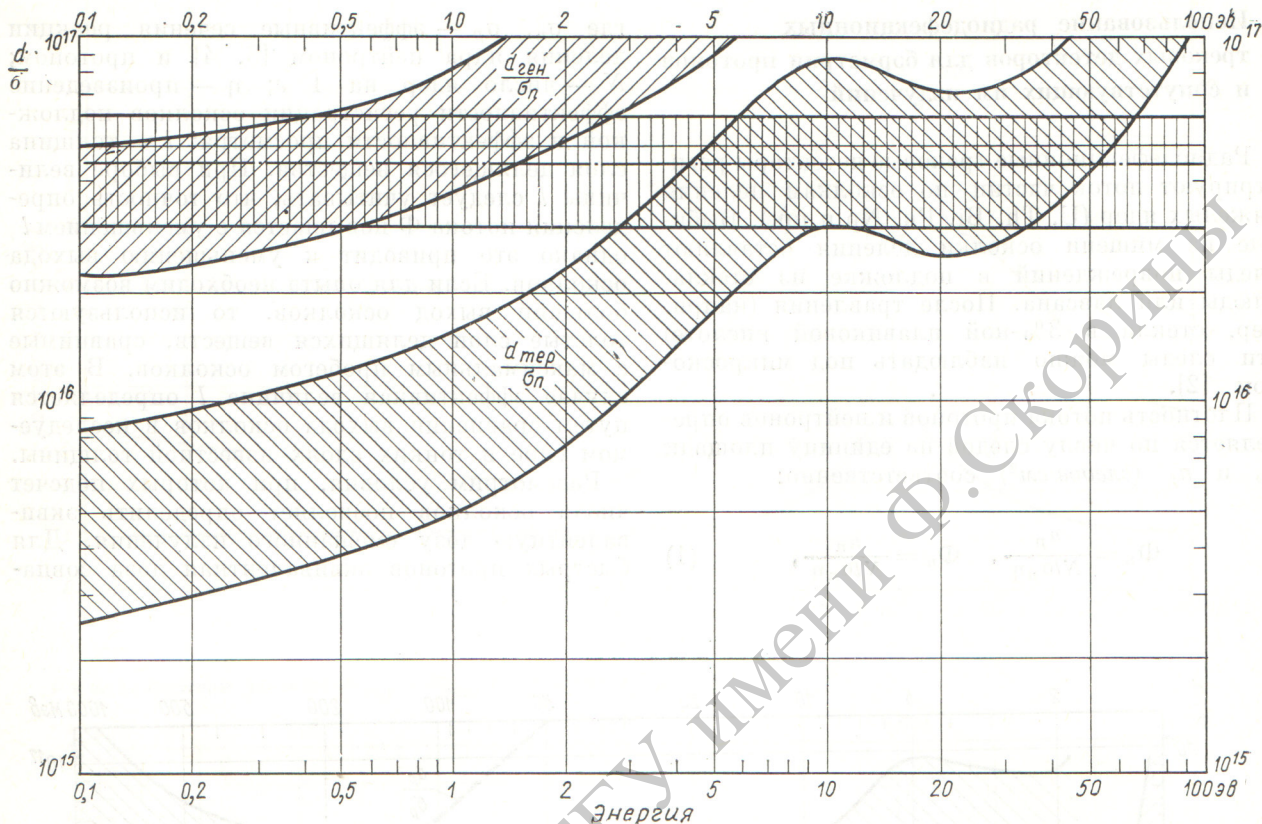
Плотность потока протонов и нейтронов определяется по числу следов на единицу площади  $n_p$  и  $n_n$  (следов/см<sup>2</sup>) соответственно:

$$\Phi_p = \frac{n_p}{Nl\sigma_p\eta}, \quad \Phi_n = \frac{n_n}{Nl\sigma_n\eta}, \quad (4)$$

где  $\sigma_n$ ,  $\sigma_p$  — эффективные сечения реакции деления ядра нейтроном [3, 4] и протоном;  $N$  — число ядер на 1 г;  $\eta$  — произведение эффективности регистрации осколков подложкой и эффективности просмотра;  $l$  — толщина слоя делящегося вещества. При выборе величины  $l$  следует учитывать, что точность определения потока  $\Phi$  повышается с уменьшением  $l$ , однако это приводит к уменьшению выхода осколков. Если для опыта необходим возможно больший выход осколков, то используются толстые слои делящихся веществ, сравнимые с максимальным пробегом осколков. В этом случае эффективная величина  $l$  определяется путем сравнения выхода осколков в исследуемом слое и тонких слоях известной толщины. Рассмотрим условия, при которых подсчет числа осколков позволяет определить эквивалентную дозу смешанного излучения. Для быстрых протонов эквивалентная доза совпа-



Р и с. 3. Зоны значений  $d_n/\sigma_n$  и  $d_p/\sigma_p$  для детектора на  $U^{238}$ .



Р и с. 4. Зоны значений  $d_n/\sigma_n$  для детектора из  $U^{238}$  с примесью  $U^{235}$  (0,4%).

дает с поглощенной:

$$D_p = 1,608 \cdot 10^{-8} \frac{dE}{dx} \Phi_p = d_p \Phi_p \text{ рад}, \quad (2)$$

для нейтронов она равна

$$D_n = d_n \Phi_n \text{ бэр}. \quad (3)$$

Эквивалентная доза смешанного излучения протонов и нейтронов определяется путем суммирования по спектру энергий излучения:

$$\begin{aligned} D &= \sum_E D_p + \sum_E D_n = \\ &= \sum_E \frac{d_p n_p}{N l \sigma_p \eta} + \sum_E \frac{d_n n_n}{N l \sigma_n \eta} \text{ бэр}, \quad (4) \end{aligned}$$

где представлена на рис. 2 для разных условий определения фактора качества. Величина  $D$  пропорциональна наблюдаемому числу осколков деления  $n = \sum_E n_p + \sum_E n_n$  для той части спектра, для которой все коэффициенты  $d_p/\sigma_p$  и  $d_n/\sigma_n$  равны между собой. Значения этих коэффициентов для  $U^{238}$  приведены на рис. 3. Для нейтронов построены две зоны, соответствующие разным определениям  $K_{ген}$  и  $K_{тер}$ . Например, пусть пучок протонов имеет энергию 200 Мэв. Ему соответствует \*  $d_p/\sigma_p = 4,5 \times 10^{16}$  бэр. Такие же значения  $d_n/\sigma_n$  с точностью до двух имеют нейтроны с энергиями выше 2 Мэв. Таким образом, для указанной области спектра осколочный детектор с мишенью из  $U^{238}$  удовлетворяет условиям баретрии по критерию  $K_{ген}$ . Область допустимых значений  $d/\sigma$

где  $d_n$  — эквивалентная доза на единичный поток нейтронов, зависимость которой от энер-

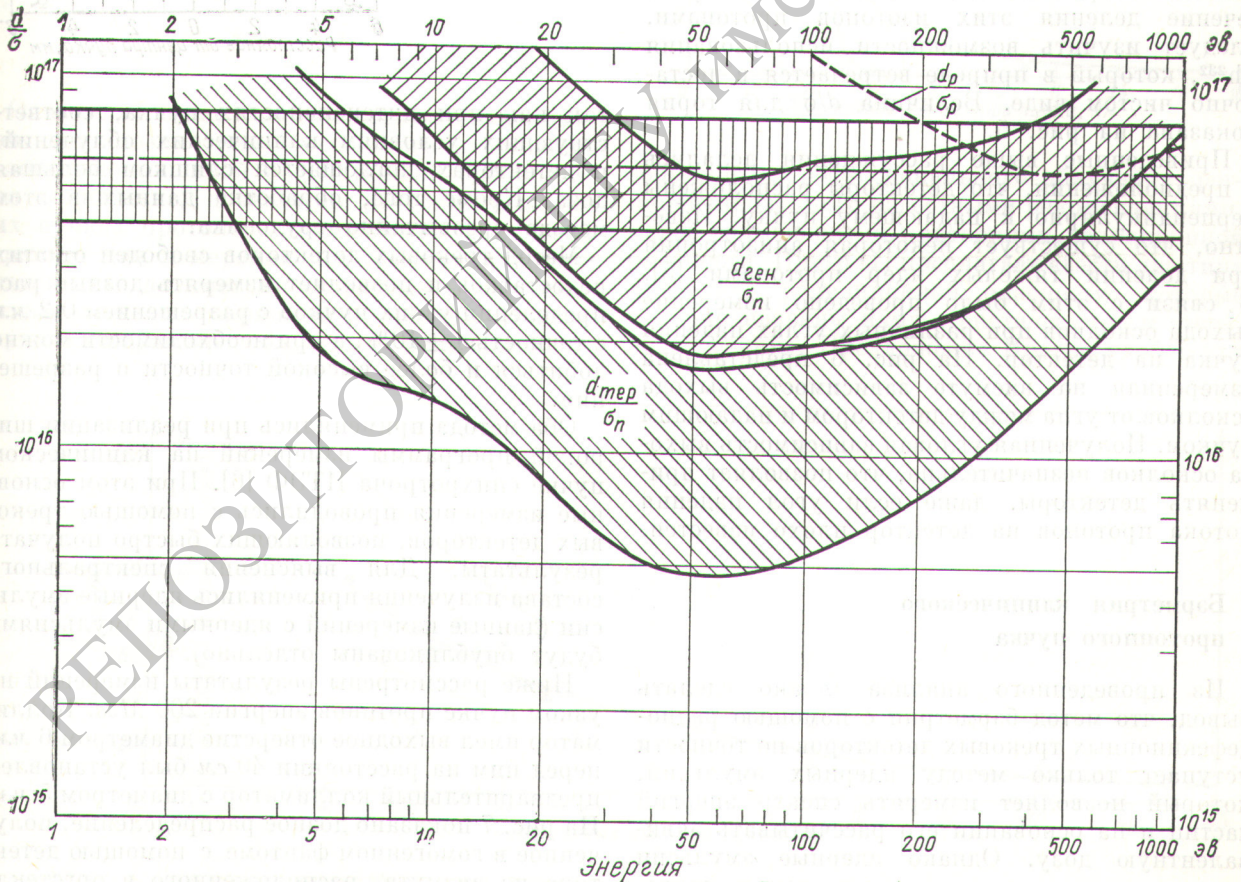
\* При этом значения  $d_p/\sigma_p$  и толщине детектора 1 мж эквивалентная доза для протонов энергии 200 Мэв: при  $n_p = 10^4$  осколков/см<sup>2</sup> равна 200 бэр ( $\eta=1$ ).

соответствует заштрихованной полосе на рис. 3. Кроме того, можно сделать вывод, что примесь более медленных протонов с энергией  $100 \text{ Мэв} < E_p < 200 \text{ Мэв}$  не будет существенно искажать результат измерений. Таким образом, для пучка протонов с энергией  $200 \text{ Мэв}$  детектор деления  $U^{238}$  позволяет измерять дозу протонов и нейтронов с их факторами качества  $K_{\text{ген}}$  именно в той области спектра энергий, в которой обычно заключено практически все первичное и вторичное излучение.

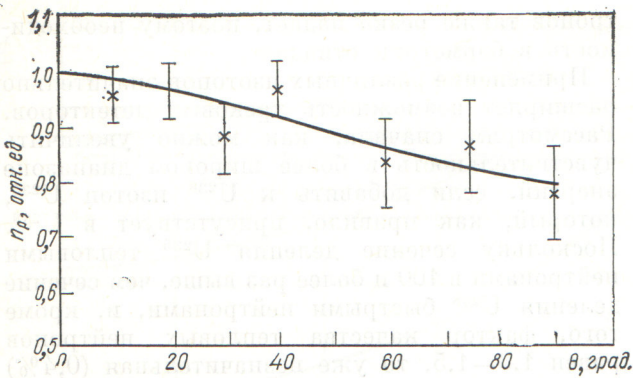
Труднее определить  $K_{\text{тер}}$ . Как видно из рис. 3 (нижняя кривая), в этом случае доза от нейтронов будет завышена в несколько раз. Однако при переходе к более высоким энергиям протонов мы постепенно приближаемся к условиям  $K_{\text{тер}}$ . Для энергии протонов ниже  $100 \text{ Мэв}$  метод оказывается несостоятельным, так как кривая  $d_p/\sigma_p$  уходит резко вверх. Однако в этой области вклад вторичных ней-

тронов также резко падает, поэтому необходимость в барметрии отпадает.

Применение различных изотопов значительно расширяет возможность трековых детекторов. Рассмотрим сначала, как можно увеличить чувствительность в более широком диапазоне энергий, если добавить к  $U^{238}$  изотоп  $U^{235}$ , который, как правило, присутствует в  $U^{238}$ . Поскольку сечение деления  $U^{235}$  тепловыми нейтронами в 100 и более раз выше, чем сечение деления  $U^{238}$  быстрыми нейтронами, и, кроме того, фактор качества тепловых нейтронов равен 1,3—1,5, то уже незначительная (0,4%) добавка  $U^{235}$  позволяет с достаточной эффективностью регистрировать тепловые нейтроны. На рис. 4 показаны кривые для этого детектора, которые аналогичны кривым рис. 3. Детекторы такого типа малочувствительны лишь в области промежуточных нейтронов. Этот недостаток, очевидно, может быть и уstra-



Р и с. 5. Зоны значений  $d_n/d_n$  и  $d_p/\sigma_p$  для детектора из тория.



Р и с. 6. Выход осколков деления в зависимости от угла  $\theta$  между детектором из висмута и падающим пучком.

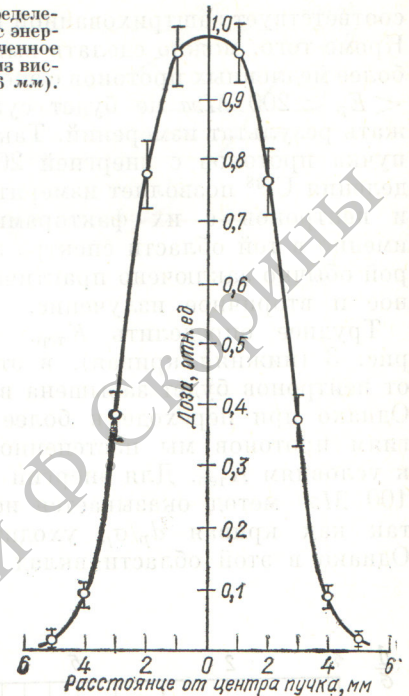
нен, если использовать такие изотопы, как  $Pu^{240}$  и  $Np^{237}$ , для которых область деления более широкая и включает промежуточные нейтроны. Однако вопрос о применении этих изотопов для бэрметрии клинического пучка остается открытым, так как пока не измерено сечение деления этих изотопов протонами. Следует изучить возможности использования  $Th^{232}$ , который в природе встречается в достаточно чистом виде. Величина  $d/\sigma$  для тория показана на рис. 5.

Приведенные выше рассуждения делались в предположении, что детекторы расположены перпендикулярно к падающему пучку. Известно, что существует некоторая анизотропия при делении тяжелых ядер протонами [5]. В связи с этим было проведено измерение выхода осколков при различных углах падения пучка на детектор. На рис. 6 представлена измеренная на висмуте зависимость выхода осколков от угла между детектором и падающим пучком. Полученная угловая зависимость выхода осколков незначительна, что позволяет применять детекторы, даже если угол падения потока протонов на детектор плохо известен.

### Бэрметрия клинического протонного пучка

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что метод бэрметрии с помощью радиодефекционных трековых детекторов по точности уступает только методу ядерных эмульсий, который позволяет измерять спектр энергий частиц и на основании его рассчитывать эквивалентную дозу. Однако ядерные эмульсии трудно использовать, если измерения проводятся в непосредственной близости к пучку,

Р и с. 7. Дозное распределение в пучке протонов с энергией 200 Мэв, полученное с помощью детектора из висмута (диаметр пучка 6 мм).



так как при интенсивностях пучка, соответствующих условиям клинических облучений, в детекторах поглощается слишком большая доза. Кроме того, обработка данных в этом методе чрезвычайно трудоемка.

Метод трековых детекторов свободен от этих недостатков и позволяет измерять дозные распределения узких пучков с разрешением 0,2 мм с точностью  $\pm 10\%$ , а при необходимости можно добиться и более высокой точности и разрешения.

Оба метода применялись при реализации широкой программы измерений на клиническом пучке синхротрона ИТЭФ [6]. При этом основные измерения проводились с помощью трековых детекторов, позволяющих быстро получать результаты. Для выяснения спектрального состава излучения применялись ядерные эмульсии (данные измерений с ядерными эмульсиями будут опубликованы отдельно).

Ниже рассмотрены результаты измерений на узком пучке протонов энергии 200 Мэв. Коллиматор имел выходное отверстие диаметром 6 мм, перед ним на расстоянии 40 см был установлен предварительный коллиматор с диаметром 5 мм. На рис. 7 показано дозное распределение, полученное в гомогенном фантоме с помощью детектора из висмута, расположенного в оргстекле на глубине 6,3 см.

При увеличении дозы облучения в 10 раз центральная часть распределения оказывается переоблученной, а периферийная часть измеряется с хорошей точностью вплоть до 1% изодозы. На рис. 8 приведено дозное распределение на краю пучка, полученное при облучении фантома в той же геометрии. Пунктирная кривая представляет собой расчетное дозное распределение только от протонов. Расхождение между расчетной и экспериментальной кривой можно объяснить вкладом нейтронов, а также протонов, рассеянных краями коллиматора.

Для получения более низких уровней дозного распределения необходимо произвести облучение еще большей дозой. На рис. 9 показано дозное распределение вдали от широкого пучка протонов с энергией 155 Мэв. На этом же рисунке приведены результаты, полученные с помощью ядерных эмульсий. Пунктирные кривые указывают область возможных ошибок метода.

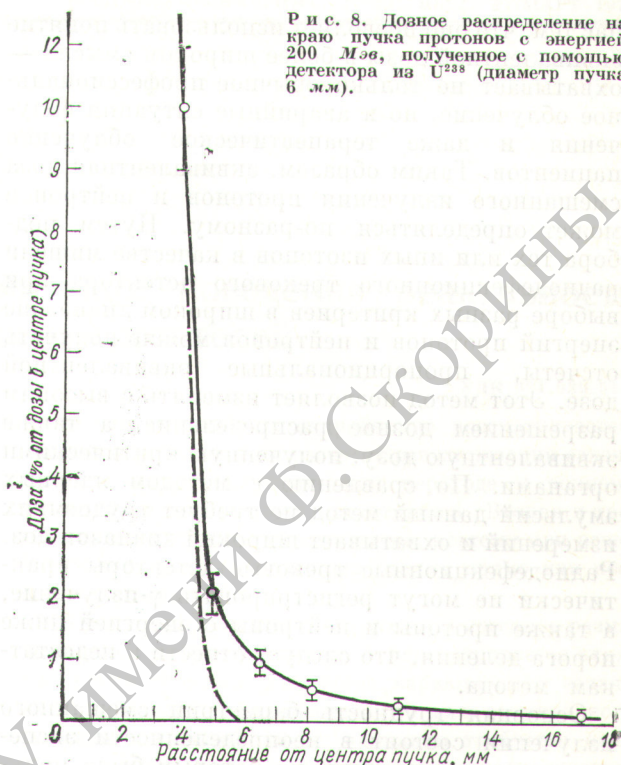


Рис. 8. Дозное распределение на краю пучка протонов с энергией 200 Мэв, полученное с помощью детектора из  $U^{238}$  (диаметр пучка 6 мм).

Описанный выше метод может быть использован для дозиметрии смешанного излучения в зонах повышенной радиационной опасности: для клинической дозиметрии на узких и широких пучках протонов, применяемых в лучевой терапии, для измерения доз облучения космонавтов, для дозиметрии «горячих» точек ускорителя тяжелых заряженных частиц. В этих случаях характер облучения отличается от

«обычного» профессионального облучения, регламентированного известными рекомендациями, менее завышенными критериями радиационной опасности. Прэтр [4] предлагает ввести два типа критериев радиационной опасности, которые условно названы нами «генетическим» и «терапевтическим». Предложение Прэтра удобно для

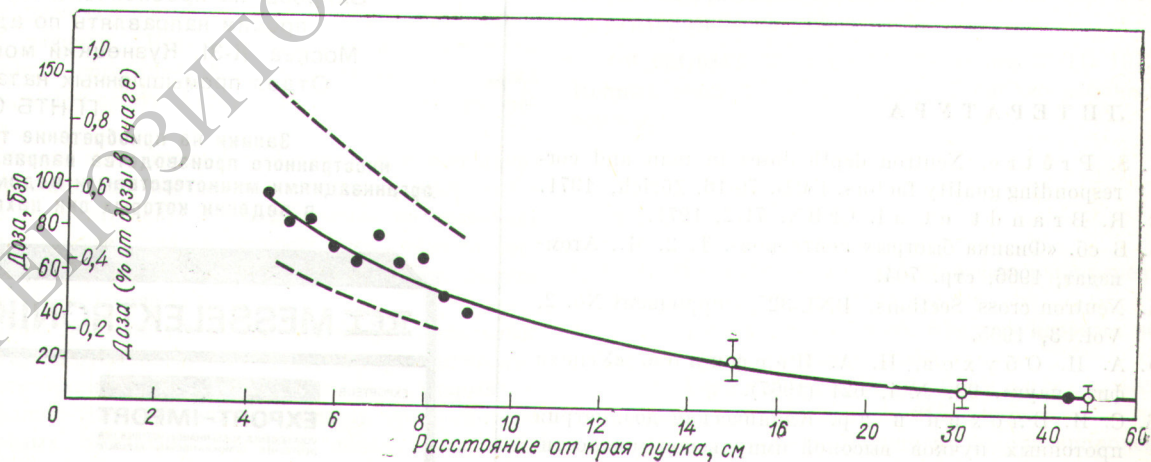


Рис. 9. Дозное распределение вблизи пучка протонов с энергией 155 Мэв (доза в очаге 16 град коллиматор 7×9 см): ● — трековый детектор; ○ — ядерные эмульсии.

нас тем, что оно позволяет использовать понятие эквивалентной дозы в более широком смысле — охватывает не только обычное профессиональное облучение, но и аварийные ситуации облучения и даже терапевтическое облучение пациентов. Таким образом, эквивалентная доза смешанного излучения протонов и нейтронов может определяться по-разному. Путем подбора тех или иных изотопов в качестве мишени радиодефекционного трекового детектора при выборе разных критериев в широком диапазоне энергий протонов и нейтронов можно получать отсчеты, пропорциональные эквивалентной дозе. Этот метод позволяет измерять с высоким разрешением дозное распределение, а также эквивалентную дозу, полученную критическими органами. По сравнению с методом ядерных эмульсий данный метод не требует трудоемких измерений и охватывает широкий диапазон доз. Радиодефекционные трековые детекторы практически не могут регистрировать  $\gamma$ -излучение, а также протоны и нейтроны с энергией ниже порога деления, что следует отнести к недостаткам метода.

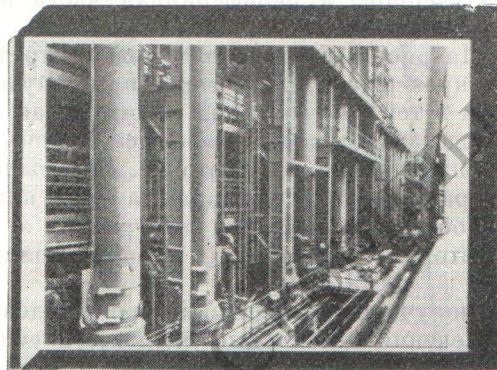
Основная трудность барметрии смешанного излучения состоит в неопределенности экспериментальных данных, по которым была получена зависимость эквивалентной дозы от энергии нейтронов. Предлагаемый метод обеспечивает изменение дозы непосредственно в бэрах при той точности, с которой могут быть обоснованы общепринятые значения эквивалентных доз.

Поступила в Редакцию 24/III 1972 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S. Prêtre. Neutron depth doses in man and corresponding quality factors. FMB, 70-16, Zürich, 1971.
2. R. Grandt et al. CERN, 71-2, 1971.
3. В сб. «Физика быстрых нейтронов». Т. 2. М., Атомиздат, 1966, стр. 704.
4. Neutron cross Sections, BNL-325, Supplement No. 2, Vol. 3, 1965.
5. А. И. Обухов, Н. А. Перфилов. «Успехи физ. наук», 92, № 4, 621 (1967).
6. С. И. Блохин и др. Клиническая дозиметрия протонных пучков высокой импульсной мощности. IV Всесоюзное координационное совещание по дозиметрии интенсивных потоков ионизирующих излучений (Москва, 1971).

## РАДИОАКТИВНЫЕ АТОМЫ



Мы имеем накопленный в течение 17 лет опыт по использованию источников излучения в измерительных устройствах для регулирования процессов и предлагаем Вам:

ОСНОВНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ МАСС, ТОЛЩИНЫ И ПЛОТНОСТИ, УРОВНЕЙ НАПОЛНЯЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ, АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ,  
ПОМОЩЬ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ;  
УСЛУГИ ПРИ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ;  
СЕРВИС;  
СОЛИДНОЕ ПАРТНЕРСТВО.

Подробную техническую и коммерческую информацию Вы получите через

**Торговое представительство ГДР в СССР,**

**Отдел электротехники и электроники,**

**Москва, Г-200, ул. Димитрова, 31.**

Запросы на проспекты и их копии просим направлять по адресу:

Москва, К-31, Кузнецкий мост, 12, Отдел промышленных каталогов

ГПНТБ СССР,

Заявки на приобретение товаров иностранного производства направляются организациями министерствам и ведомствам, в ведении которых они находятся.

### REF MESSELEKTRONIK

EXPORTEUR:

*Elektrotechnik*

**EXPORT-IMPORT**

VOLKSEIGENER AUSSENHANDELSBETRIEB DER

DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK

DDR 102 BERLIN ALEXANDERPLATZ

HAUS DER ELEKTROINDUSTRIE