

чества, почти не влияя на особенности общего распределения рудных скоплений в жилах и на перспективность отдельных жил и жильных узлов в целом.

Учитывая приуроченность кальцит-антраколитовой минерализации к крупным жилам, основным породы песчано-сланцевой толщи, увеличение интенсивности ее проявления с глубиной, ассоциацию с газообразными углеводородами, а также данные по изучению изотопного состава углерода в антраколите ( $C^{12}/C^{14} = 0.94$ , выполнено А. И. Тугариновым), можно с большой долей вероятности предположить, что поздние порции гидротермальных растворов заимствовали органическое вещество из толщи подстилающих углисто-глинистых слан-

цев. Эти породы в ядерной части антиклинали залегают сравнительно неглубоко под песчано-сланцевыми породами, вмещающими рудные жилы.

Поступила в Редакцию 7/X 1963 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Дымков. Урановая минерализация Рудных гор. М., Атомиздат, 1960.
2. В. И. Рехарский, О. В. Крутецкая, И. В. Дуброва. «Геология рудных месторождений», № 4, 103 (1959).
3. В. И. Рехарский. Там же, № 1, 92 (1960).
4. H. Hoekstra, L. Fuchs. Econ. Geol., 55, No. 8 (1960).
5. С. И. Толдыкин и др. Атлас структур и тектур руд. М., Госгеолтехиздат, 1954.

УДК 628.58.629.19

## Методика экспериментального изучения защитных свойств материалов на протонном пучке синхроциклотрона в Дубне

В. П. Афанасьев, И. Б. Кеирим-Маркус, Е. Е. Ковалев,  
В. А. Сакович, Л. Н. Смиранный, М. А. Сычков

В связи с возросшим интересом к расчету и проектированию защиты от протонов высоких энергий рассмотрена возможность изучения защитных свойств различных материалов с помощью коллимированного пучка протонов, получаемого на синхроциклотроне Объединенного института ядерных исследований. Обоснована методика перехода от геометрии «узкого пучка» к геометрии «широкого пучка». Разобраны возможные методы регистрации величины дозы за защитой. Описан использованный авторами метод получения моноэнергетических пучков протонов с энергией 100–660 Мэв. Приведены характеристики полученных пучков и на основании экспериментальных данных оценена примесь нейтронов в выходящем пучке.

В связи с опасностью радиационных поражений при космических полетах в настоящее время большое практическое значение приобрела проблема защиты космонавта от проникающих излучений. Известно [1–4], что в основном эта опасность связана с интенсивным протонным излучением солнечных вспышек и внутреннего радиационного пояса Земли. Для снижения уровней облучения космонавта до допустимых значений, по-видимому, потребуется значительная толщина защиты обитаемой кабины космического корабля. При полном поглощении протонов (чего добиваются, напри-

мер, при защите персонала, обслуживающего ускорители) доза за защитой определяется вторичными нейтронами. При частичной защите, которую, вероятно, будут часто применять на космических аппаратах, доза будет в значительной степени обусловлена протонами, прошедшими сквозь защиту. Поскольку в настоящее время отсутствуют надежные методы расчета защиты от протонов высоких энергий и мало исходных данных для расчета, необходимо проводить модельные эксперименты.

Так как в космическом пространстве придется иметь дело с протонами, имеющими различные угловые и энергетические распределения, модельные эксперименты должны обеспечить возможность изучения защиты от широкого параллельного пучка моноэнергетических протонов при различных энергиях протонов и углах падения их на защиту. Для изучения защиты следует выбирать конструкционные материалы и материалы, имеющие специфические защитные свойства, и оценивать их по ослаблению тканевой дозы излучения в биологических эквивалентах рада или в радах. В последнем случае необходимо знать относительную биологическую эффективность излу-

чения за защитой, т. е. иметь сведения о дозовом составе излучения.

Эксперименты по изучению защиты от протонов высоких энергий проводили на синхроциклотроне Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

Характеристики выведенного пучка протонов синхроциклотрона позволяют моделировать наиболее важную часть энергетического спектра протонов космического излучения. Ускоритель испускает узкий пучок протонов диаметром  $\sim 8$  см на расстоянии 7 м от выходного окна с расходимостью  $\sim 40'$ . Полный поток протонов в пучке достигает  $(1-4) \cdot 10^{11}$  сек $^{-1}$ . Энергетический спектр протонов отличается высокой монохроматичностью ( $\pm 3$  Мэв) при средней энергии протонов около 660 Мэв [5, 6].

Методика использования пучка протонов синхроциклотрона сводится к моделированию узким пучком широкого пучка протонов, изучению защитных свойств при наклонном падении пучка, оценке вклада вторичных излучений, образованных в защите, и к получению монохроматических пучков протонов с различной энергией в диапазоне 100—700 Мэв.

Для моделирования широкого мононаправленного пучка протонов можно использовать соображения, развитые в работе [7] для задачи о прохождении  $\gamma$ -лучей через вещество. Из приведенного рисунка видно, что каждому протону из широкого пучка, попавшему в детектор А, однозначно соответствуют протоны из узкого пучка, пришедшие в детекторы, расположенные в точках  $A_0, A_1, A_2$  и т. д. У этих протонов одинаковы углы отклонения и пути, пройденные в защите до и после взаимодействия, а также условия прохождения защиты протонами, не испытавшими рассеяния. Таким образом, если при применении узкого пучка измерять поглощенную дозу излучения не только в точке  $A_0$ , но и в достаточном числе других точек, расположенных в плоскости, параллельной слою защиты, то можно получить полные сведения об ослаблении широкого параллельного пучка протонов в защите.

При прохождении через вещество протоны теряют свою энергию в столкновениях с электронами (ионизационные потери), испытывают упругое (кулоновское и дифракционное) рассеяние и неупругие взаимодействия с ядрами вещества. В результате происходит постепенное уменьшение энергии протонов, отклонение от направления первоначального движения, частичное поглощение пучка протонов ядрами вещества и образование вторичных частиц в

защите. С учетом этого интегральная поглощенная доза  $Q$  в тонком слое толщиной  $d_0$  (г/см $^2$ ), параллельном плоскости защиты, на которую нормально падает узкий пучок протонов, определяется выражением

$$Q = 2\pi k P N d_0 \int_0^{\delta} dy \int_0^{\pi/2} e^{-\sigma_{ay}} \frac{d\sigma(\theta, y, E)}{d\Omega} S(\theta, y, E) \times \left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\theta, y} \operatorname{tg} \theta d\theta \quad (1)$$

где  $Q$  — мощность интегральной поглощенной дозы, г·рад/сек;  $P$  — полный поток протонов в пучке, сек $^{-1}$ ;  $k$  — переходный множитель;  $N$  — число атомов в 1 г вещества защиты;  $y$  — расстояние в защите, отсчитываемое от места выхода пучка;  $\delta$  — толщина защиты, г/см $^2$ ;  $\sigma_a$  — сечение неупругого взаимодействия протонов с веществом защиты;  $\frac{d\sigma(\theta, y, E)}{d\Omega}$  — эффективное дифференциальное сечение, учитывающее все процессы упругого рассеяния протонов в веществе защиты;  $S(\theta, y, E)$  — дозовый вклад вторичных частиц, образованных в защите в результате ядерных взаимодействий протонов;  $\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\theta, y}$  — массовые потери энергии протонов в слое  $d_0$ , усредненные для протонов, рассеянных под углами  $\theta$ , Мэв·см $^2$ /г.

Рассмотрим случай, когда на защиту нормально падает широкий пучок протонов с плотностью потока  $\Phi$  (см $^{-2}$ ·сек $^{-1}$ ). В этом случае мощность поглощенной дозы  $D$  (рад/сек) за защитой равна

$$D = 2\pi k \Phi N \int_0^{\delta} dy \int_0^{\pi/2} e^{-\sigma_{ay}} \frac{d\sigma(\theta, y, E)}{d\Omega} S(\theta, y, E) \times \left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\theta, y} \operatorname{tg} \theta d\theta \quad (2)$$

При определении мощности интегральной поглощенной дозы для узкого и широкого пучков основные трудности связаны с нахождением функций  $\frac{d\sigma(\theta, y, E)}{d\Omega}$  и  $S(\theta, y, E)$ . Однако для экспериментального изучения защитных свойств материалов на протонном пучке синхроциклотрона достаточно того, чтобы эти функции в обоих рассмотренных случаях были одинаковыми. Таким образом, из выражений (1) и (2) получаем

$$\frac{D}{\Phi} = \frac{Q}{P d_0} = q \quad (3)$$

(здесь  $q$  — удельная поглощенная доза), т. е. поглощенная доза на единичный поток протонов в широком пучке равна интегральной поглощенной дозе на единичный поток протонов в узком пучке, переданной слою вещества толщиной в  $1 \text{ г/см}^2$ . Из уравнения (3) следует, что  $D = q\Phi$ .

С другой стороны, мощность поглощенной дозы  $D$  от широкого пучка протонов с плотностью потока  $\Phi$ , создаваемая за слоем защиты толщиной  $\delta$ , может быть записана в виде

$$D = q_0 f(\delta, E_0) \Phi, \quad (4)$$

где  $f(\delta, E_0)$  — дозовый фактор ослабления и накопления; индекс 0 относится к пучку протонов до защиты. Очевидно, что

$$q = q_0 f(\delta, E_0). \quad (5)$$

При измерениях с узким пучком  $f$  можно определить как

$$f = \frac{Q(\delta)}{Q(0)},$$

где  $Q(0)$  и  $Q(\delta)$  — соответственно интегральные поглощенные дозы без защиты и за защитой толщиной  $\delta$ .

Таким образом, изучение защиты от широкого пучка протонов сводится к экспериментальному определению  $q$  или  $Q$ . Из формулы (1) следует, что для определения  $Q$  нужно провести интегрирование по объему детектора, параллельного слою защиты. Экспериментально такое интегрирование может быть осуществлено размещением достаточного числа датчиков (например, дозиметров ИЛК или ампул с раствором соли Мора) и суммированием их показаний. Этот способ удобен тем, что по отношению показаний крайних детекторов к показаниям детекторов в центре дозного поля можно судить о погрешности, возникающей из-за конечных размеров площади, на которой размещены детекторы. Распределение поглощенной дозы за защитой в плоскости, перпендикулярной пучку, определяли экспериментально вплоть до больших расстояний от оси пучка. Оцененная погрешность не превышала 5%.

Другой способ определения  $Q$  основан на использовании дозиметров с достаточно большой поверхностью (например, плоских кювет с раствором соли Мора), отличающихся простотой измерений. Поскольку химический дозиметр по составу мало отличается от воды, поглощение излучений различных типов и энергий обусловлено процессами взаимодействия, близкими к процессам, происходящим в тка-

нях или жидкостях организма. Такой дозиметр имеет малый ход с жесткостью.

При изучении наклонного падения широкого пучка протонов на защиту можно также использовать дозовый фактор ослабления и накопления, который по аналогии со случаем нормального падения можно записать в виде

$$f_\alpha(\delta, E_0) = \frac{Q_\alpha(\delta)}{Q_\alpha(0)},$$

где  $Q_\alpha(0)$  и  $Q_\alpha(\delta)$  — мощность интегральной поглощенной дозы от узкого пучка без защиты и за защитой толщиной  $\delta$ , расположенной под углом  $\alpha$  к направлению пучка протонов (см. рисунок), причем  $Q_\alpha(\delta)$  измеряется в плоскости, параллельной защите.

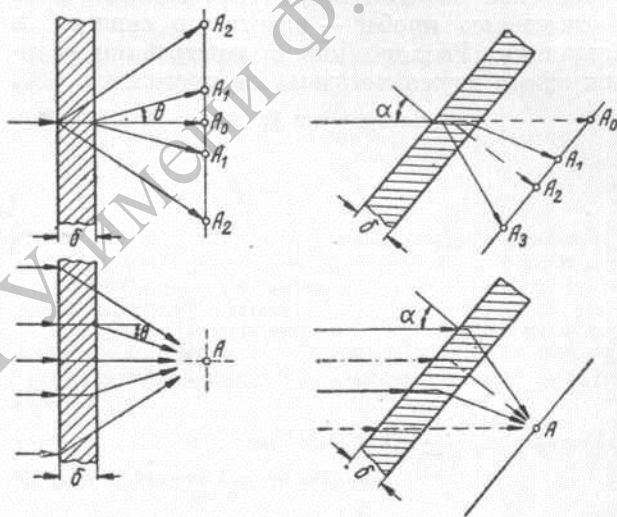


Схема перехода от узкого пучка к широкому в случае нормального и наклонного падений.

В заключение остановимся на получении пучков протонов с более низкими энергиями. Протоны от синхроциклотрона пропускали через поглотитель из полиэтилена, в котором они теряли часть энергии. Толщину поглотителя выбирали в соответствии с данными работы [6].

Для улучшения моноэнергетичности пучка и для очистки его от вторичных излучений, выходящих из поглотителя, пучок отклоняли магнитом и выводили через коллиматор за защитную стену толщиной 3 м.

Величину потока нейтронов оценивали сопоставлением показаний детекторов, имеющих существенно различную чувствительность к нейтронам и протонам. Использовались детекторы, измеряющие поглощенную энергию: химические дозиметры, люминесцентный дозиметр

(ИЛК) и термолюминесцентный дозиметр из стекла (ИКС) [8], а также индикаторы из углерода и алюминия.

Как показали предварительные эксперименты, чувствительность дозиметров ИЛК и ИКС к нейтронам более чем на порядок меньше их чувствительности к протонам. Из сопоставления показаний дозовых детекторов (химических, ИЛК и ИКС) и индикаторов потока (углерода и алюминия) видно, что примесь потока нейтронов в пучке, выходящем из коллиматора, не превышает 5—6% в диапазоне энергий протонов 100—600 Мэв. Таким образом, использованный метод сброса энергии протонов позволил получить достаточно чистое излучение.

Значение энергии протонов за поглотителем определяли методом магнитного анализа и по соотношению пробег — энергия в свинце и алюминии. Расхождение в определении энергии этими двумя методами не превышало 6%.

Поступила в Редакцию 28/III 1963 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Вернов, А. Е. Чудаков. «Усп. физ. наук», 70, 585 (1960); «Искусственные спутники Земли». Вып. 5, 24 (1960); вып. 10, 40 (1961).
2. J. Van Allen et al. Nature, 183, 430 (1959); J. Van Allen, J. Winckler. Phys. Rev., 106, 1072 (1957).
3. S. Freden, R. Write. Phys. Rev. Lett., 3, 9, 145 (1959).
4. H. Schaefer. Astronautics, 6, No. 2 (1961); H. Schaefer. Aerospace Med., 31, 807 (1960).
5. В. П. Зрелов, Г. Д. Столетов. «Ж. эксперим. и теор. физ.», 36, 658 (1959).
6. И. М. Василевский, Ю. Д. Прокошкн. «Атомная энергия», 7, 225 (1960).
7. F. Kirn et al. Radiology, 63, 94 (1954).
8. И. Б. Кеirim-Маркус, З. М. Сырицкая, В. В. Якубик. Стекло. Бюллетень Государственного института стекла, № 2, 77 (1961); И. А. Бочвар и др. «Атомная энергия», 15, 48 (1963).

