

## ДОЗИМЕТРИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА БЕТАТРОНА В КРИСТАЛЛАХ ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ СОЛЕЙ

В. Н. РУДЕНКО

### Введение

При исследовании радиационных нарушений в твердом теле, производимых электронами высокой энергии, при определении светового выхода сцинтилляторов, выборе материалов радиационной защиты необходимо знание глубины проникновения электронов в вещество, потерь энергии электронами при прохождении через тормозящий материал, характера рассеяния электронов, влияние рассеяния электронов на глубину их проникновения в вещество и потери энергии.

Целью нашей работы было исследование прохождения электронов энергии  $5 \div 12$  Мэв, выведенных из бетатрона через кристаллы щелочно-галогидных солей: распределения поглощенной энергии электронного пучка бетатрона в кристаллах, определение отношения падающей и поглощенной энергии электронного пучка в кристаллах, зависимости глубины проникновения электронов от химического состава кристаллов, исследование характера рассеяния электронов в кристаллах, установление связи между глубиной проникновения электронов и интенсивностью рассеяния в кристаллах различного химического состава.

Теория потерь энергии электронами при прохождении через вещество разработана Бором, Блохом, Бете, Гайтлером и другими исследователями [1, 2, 4, 9] сравнительно давно. Экспериментальные исследования потерь энергии электронами в тонких фольгах [7, 10, 8] показали хорошее согласие экспериментальных данных с теорией. Вопрос о рассеянии электронов при прохождении через вещество также рассмотрен рядом исследователей, как часть общего вопроса о рассеянии заряженных частиц в веществе [3, 9, 13].

Дозиметрические исследования прохождения электронов высокой энергии ( $1 \div 30$  Мэв) через вещество были проведены Лафлиным, Брейтлингом и другими [11, 12]. Лафлин и сотрудники [12] исследовали распределение доз в водяном фантоме при облучении его электронным пучком бетатрона для разной энергии электронов в пучке и диаметре пучка. Брейтлинг [10] исследовал распределение потерь энергии электронного пучка бетатрона в образцах различного химического состава, в основном в металлах.

Обратное рассеяние электронов высокой энергии также являлось предметом исследования ряда авторов [13—16]. Райт и Трумп [14] про-

извели наиболее полное экспериментальное исследование обратно рассеянных электронов энергии  $1 \div 3$  Мэв.

В наших исследованиях, относящихся к изучению распределения доз в кристаллах щелочно-галогидных солей при облучении электронным пучком бетатрона, основное внимание было уделено определению глубины проникновения электронов в кристаллы различного химического состава, влияния рассеяния электронов на глубину их проникновения в кристаллы, связи между падающей на поверхность кристалла и поглощенной энергией электронного пучка.

### Теоретическое обсуждение

Основными видами потерь энергии электронами при прохождении через вещество являются потери на ионизацию и возбуждение атомов среды и на тормозное излучение.

При энергии электронов  $5 \div 15$  Мэв в кристаллах щелочно-галогидных солей преобладают ионизационные потери. Расчет ионизационных потерь производился по формуле Бете—Блоха [1] для средних потерь энергии электронами:

$$\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi e^4 N Z}{m_0 v^2} \left[ \ln \frac{m_0 v^2 T}{2i^2(1-\beta^2)} - \ln 2(2\sqrt{1-\beta^2}-1+\beta^2) + \right. \\ \left. + 1 - \beta^2 + \frac{1}{8} \left( 1 - \sqrt{1-\beta^2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $N$  — число атомов в  $1 \text{ см}^3$ ,  $Z$  — заряд ядра,  $I$  — средний потенциал ионизации атома.

Интересно рассмотреть удельные потери энергии электронами, т. е. потери на  $\text{г/см}^2$ . Для этого обе части уравнения (1) необходимо поделить на  $\rho$  — плотность тормозящего вещества. Поскольку  $NZ\rho$  равняется числу электронов на  $1 \text{ г}$  тормозящего вещества, которое уменьшается с ростом  $Z$ , а  $I$  изменяется по приближительному закону  $I = 11,5 Z \text{ эв}$ , то ионизационные потери уменьшаются с ростом  $Z$ .

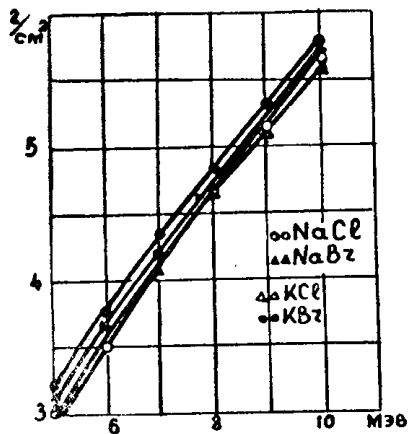


Рис. 1. Зависимость среднего пробега электронов в кристаллах от энергии.

В нашем случае расчет ионизационных потерь проводился для каждого элемента в отдельности, а затем производилось суммирование по весовым долям элемента в кристаллах соли. Потенциал ионизации подбирался интерполяцией из известных экспериментальных значений [6]. Поправка на поляризацию для ионизационных потерь подсчитывалась на основании данных Халперна и Холла [17] и Штернгеймера [4].

При энергии электронов более 1 Мэв необходимо учитывать потери энергии электронами на тормозное излучение. Радиационные потери увеличиваются пропорционально  $Z$  и поэтому имеют существенное значение для солей, содержащих в своем составе химические элементы высокого порядкового номера (KBr, NaJ, KJ).

На основании средних ионизационных потерь, поляризационной поправки и средних потерь на тормозное излучение были рассчитаны пробеги электронов в ряде кристаллов щелочно-галогидных солей. Такой расчет является не совсем точным, однако он позволяет оценить сравнительную величину пробегов электронов в кристаллах различного химического состава.

На рис. 1 приведены расчетные пробеги электронов в кристаллах солей NaCl, NaBr, KCl, KBr. В интервале энергий  $5 \div 10$  Мэв пробеги электронов в этих кристаллах отличаются незначительно (не более 2%). Это объясняется тем, что с ростом  $Z$  и увеличением радиационных потерь уменьшаются потери на ионизацию и возбуждение атомов среды.

### Методика эксперимента

Источником электронов высокой энергии служил бетатрон на 15 Мэв (рис. 2). Электроны выводились из бетатрона электростатическим способом через выходное окно, закрытое алюминиевой фольгой толщиной 0,05 мм. Контроль интенсивности электронного пучка осуществлялся проходной ионизационной камерой. Измерение интенсивности электронного пучка осуществлялось калориметром и цилиндром Фарадея.

Исследование потерь энергии электронного пучка в кристаллах щелочно-галогидных солей производилось миниатюрными ионизационными камерами объемом  $0,2-0,4$  см<sup>3</sup> (рис. 3). Стенки камер изготавливались из

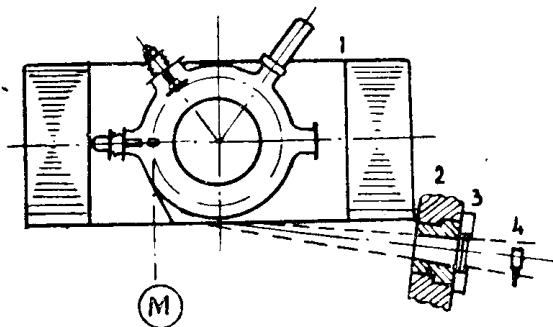


Рис. 2. Схема расположения аппаратуры: 1 — бетатрон, 2 — коллиматор, 3 — проходная ионизационная камера, 4 — миниатюрная ионизационная камера.

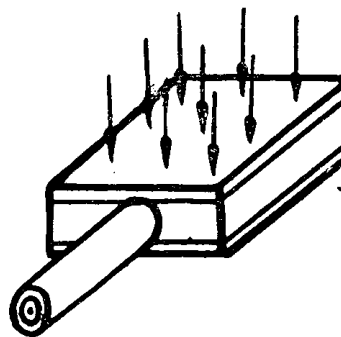


Рис. 3. Общий вид миниатюрных ионизационных камер.

кристаллов исследуемых солей. Передняя, задняя и боковые стенки камер могли наращиваться от 0,1 мм до требуемой толщины. Ионизация в камере соответствует поглощенной энергии излучения в данном месте кристалла.

Изменение толщины передней стенки камеры соответствовало перемещению воздушного объема камеры по глубине облучаемого образца, что позволяло измерять распределение ионизации по глубине кристалла исследуемой соли.

Изменение толщины задней стенки камеры позволяло изучать влияние обратного рассеяния электронов на величину дозы и исследовать зависимость интенсивности обратного рассеяния от толщины отражателя.

Распределение дозы в плоскости кристалла, перпендикулярной направлению электронного пучка, измерялось путем наращивания боковой

стенки камеры, что соответствовало перемещению воздушного объема камеры в плоскости кристалла.

Контрольные измерения производились камерой переменного объема  $0,1 \div 0,9 \text{ см}^3$  — экстраполяционной. Стенки экстраполяционной камеры также изготовлялись из кристаллов исследуемых солей.

### Экспериментальные данные

#### а. Распределение доз по глубине кристаллов

Распределение поглощенной энергии электронного пучка по глубине облучаемых образцов представлено на рис. 4, 5, 6, 7.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости распределения дозы по глубине кристаллов KCl, KBr, KJ, NaCl, NaBr и NaJ при энергии электронов в пучке 7 Мэв. На некотором расстоянии от поверхности, в которую входит электронный пучок, характерно наличие максимума дозы. Величина максимума увеличивается с ростом порядкового номера химических элементов, входящих в состав соли, а глубина проникновения электронов уменьшается. За максимумом наступает быстрое спадание дозы, причем крутизна наклона заднего фронта кривой распределения больше для более тяжелой соли.

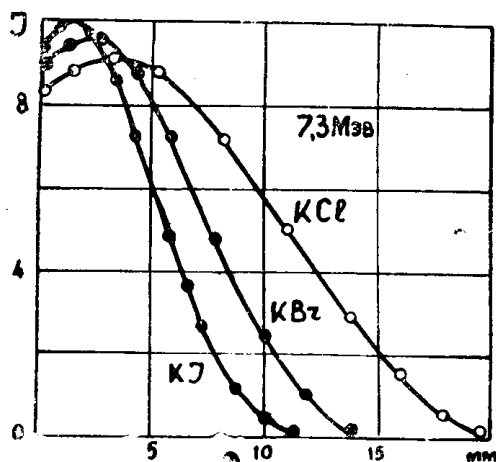


Рис. 4. Распределение дозы по глубине кристаллов KCl, KBr, KJ.

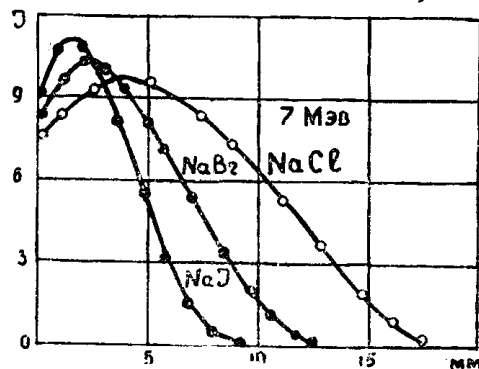


Рис. 5. Распределение дозы по глубине кристаллов NaCl, NaBr, NaJ.

На рис. 6 даны зависимости распределения дозы по глубине кристалла NaCl для разных энергий бомбардирующих электронов. С ростом энергии электронов максимум дозы незначительно сдвигается по глубине и уменьшается наклон заднего фронта кривой распределения дозы по глубине.

Для сравнения глубины проникновения электронов в солях различного химического состава на рис. 7 приведены кривые распределения дозы в кристаллах солей NaCl и NaBr, где по оси абсцисс отложена толщина поглотителя в  $\text{г/см}^2$ .

Если наиболее прямлинейный участок заднего фронта кривой распределения дозы по глубине продолжить прямой до пересечения с осью абсцисс, то полученный таким образом «экстраполированный пробег» электронов —  $R$  является характеристикой проникновения электронов в облучаемый образец. На рис. 8 представлены зависимости величины экстраполированного пробега в различных кристаллах от энергии элек-

тронов в пучке. Величина экстраполированного пробега (в  $\text{г/см}^2$ ) уменьшается с ростом порядкового номера химических элементов, входящих в состав соли.

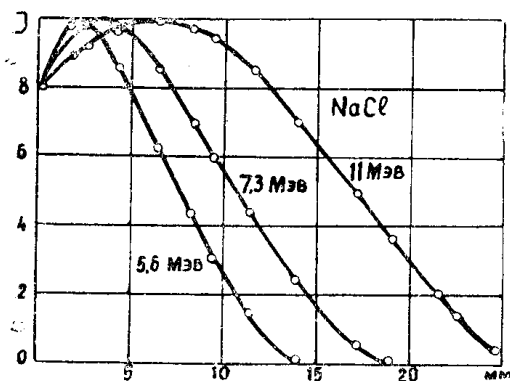


Рис. 6. Распределение дозы по глубине кристалла NaCl для разных энергий бомбардирующих электронов.

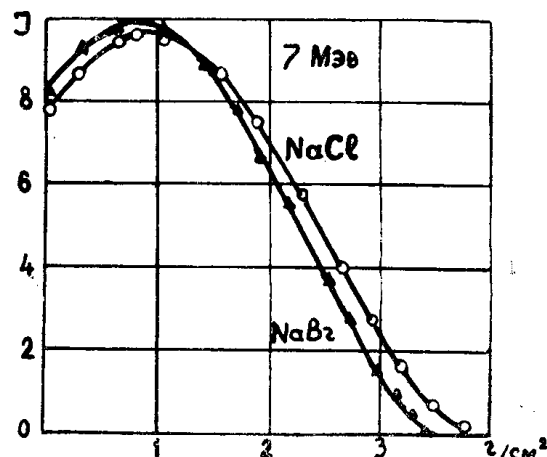


Рис. 7. Распределение дозы в кристаллах NaCl и NaBr. По оси абсцисс отложена толщина кристалла в  $\text{г/см}^2$ .

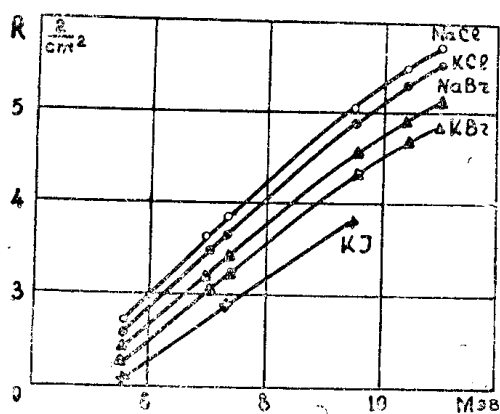


Рис. 8. Зависимость величины экстраполированного пробега электронов в кристаллах от их энергии.

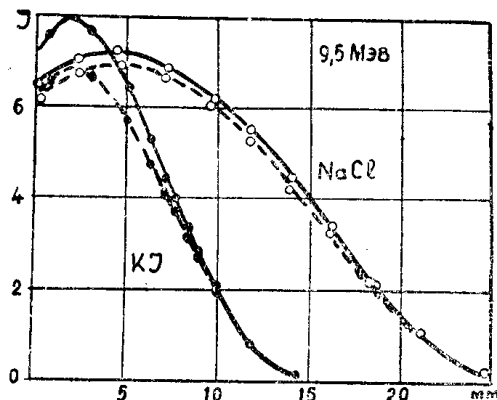


Рис. 9. Распределение дозы по глубине кристаллов KJ и NaCl с учетом обратного рассеяния. Расстояние между штриховой и сплошной кривой определяет вклад обратно рассеянных электронов в величину дозы.

## 6. Обратное рассеяние электронов

Электроны, рассеиваясь в обратном направлении, создают дополнительную дозу, величина которой зависит от химического состава кристаллов.

На рис. 9 представлено распределение дозы по глубине кристаллов NaCl и KJ, где штриховая зависимость измерена камерой, задняя стенка которой закрыта алюминиевой фольгой толщиной 0,05 мм, а сплошная зависимость измерена с помощью камеры, задняя стенка которой закрыта кристаллом. Толщина этого кристалла выбиралась такой, чтобы наступило насыщение обратно рассеянных электронов. Обратно рассеянные электроны создают дополнительную дозу по всей глубине облучаемого образца.

Зависимость интенсивности обратного рассеяния электронов (вклад в общую дозу обратно рассеянными электронами) от толщины задней

стенки — отражателя представлена на рис. 10. Как видно из рис. 10 интенсивность обратного рассеяния возрастает с ростом эффективного порядкового номера атомов кристалла.

С ростом энергии бомбардирующих электронов обратное рассеяние уменьшается. Это обусловлено тем, что при столкновении с ядром заряда  $Z$  электрон рассеивается на угол  $\Theta$ , который пропорционален  $Z^2$  и обратно пропорционален энергии электрона.

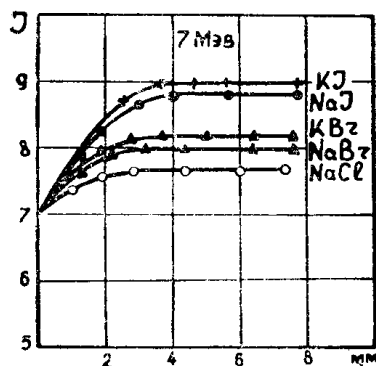


Рис. 10. Зависимость интенсивности обратного рассеяния от толщины отражателя. (Вклад в дозу обратно рассеянными электронами в зависимости от толщины задней стенки).

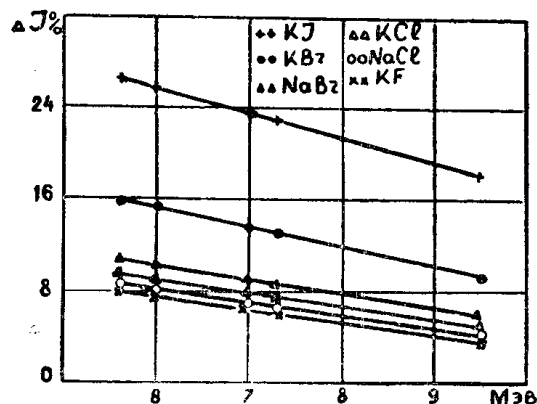


Рис. 11. Зависимость интенсивности обратного рассеяния электронов от химического состава кристаллов и энергии электронов. По оси абсцисс отложена энергия электронов, по оси ординат — процентное увеличение дозы на передней поверхности облучаемых кристаллов за счет обратно рассеянных электронов.

На рис. 11 приведены зависимости увеличения дозы на передней поверхности облучаемых кристаллов (в % к общей величине дозы) от энергии бомбардирующих электронов. Заметно существенное увеличение интенсивности обратного рассеяния с ростом эффективного порядкового номера атомов соли, незначительное уменьшение обратного рассеяния с ростом энергии электронов.

### в. Боковое рассеяния электронов

Боковое рассеяние электронов, как и обратное рассеяние, характеризует влияние рассеяния электронов на глубину их проникновения в облучаемый материал и утечки энергии электронного пучка из облучаемого образца. В результате рассеяния электронов через боковую стенку кристалла происходит уменьшение дозы от центра образца к его краю. На рис. 12 приведено распределение доз на различных расстояниях от поверхности кристалла NaCl при энергии электронов 7 Мэв.

Боковое рассеяние электронов приводит к тому, что величина дозы по глубине кристалла зависит от его поперечных размеров. На рис. 13 приведено распределение дозы по глубине кристалла NaCl при поперечных размерах  $10 \times 10 \text{ мм}^2$  и  $20 \times 20 \text{ мм}^2$ . Величина глубинной дозы меньше для меньших размеров облучаемого образца, хотя экстраполированный пробег электронов изменяется мало. Незначительная зависимость экстраполированного пробега электронов в кристалле от его поперечных размеров объясняется тем, что наибольшей глубиной проникновения обладают электроны, претерпевающие малые рассеяния, т. е. мало изменяющие первоначальное направление.

При определенных поперечных размерах образца, зависящих от его химического состава и энергии электронов, наступает «насыщение» глу-

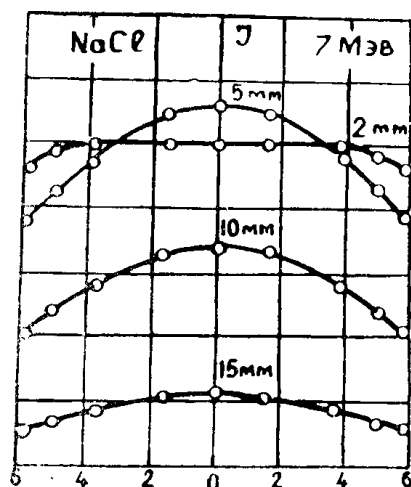


Рис. 12. Распределение доз на различных расстояниях от передней поверхности кристалла NaCl.

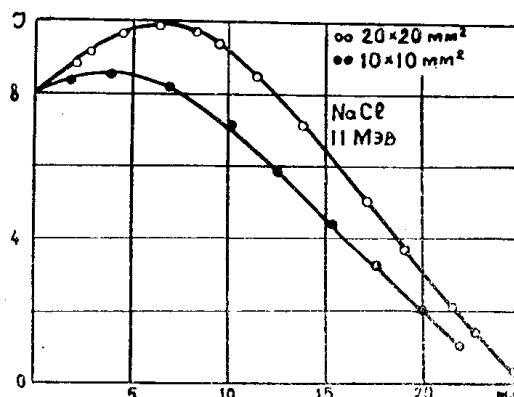


Рис. 13. Зависимость глубинной дозы от поперечных размеров образца.

бинной дозы, и дальнейшее увеличение его поперечных размеров не влияет на величину дозы по глубине.

### Обсуждение результатов

Произведем сравнение глубины проникновения электронов в кристаллах различного химического состава. Поскольку бетатрон является источником моноэнергетических электронов высокой энергии, то распределение дозы по глубине кристаллов характеризует потери энергии моноэнергетического электронного пучка в твердом теле.

Глубина проникновения электронов в кристаллы различного химического состава характеризуется экстраполированным пробегом. На рис. 8 представлена величина экстраполированного пробега (в  $г/см^2$ ) в кристаллах различного химического состава в зависимости от энергии бомбардирующих электронов.

С ростом энергии электронов в пучке экстраполированный пробег возрастает почти линейно. Небольшая нелинейность обусловлена увеличением радиационных потерь энергии электронов с ростом их энергии.

При сравнении экспериментальных данных по глубине проникновения электронов в кристаллы с расчетной длиной пробега электронов в кристаллах (рис. 1) заметна существенная разница, причем эта разница увеличивается с ростом порядкового номера химических элементов, входящих в состав кристалла. Если длина пробега электронов в кристаллах увеличивается ( $1 \div 3\%$ ) с ростом атомного номера элементов в соединении, то глубина проникновения электронов уменьшается. Такое расхождение между расчетной длиной пробега электронов в кристаллах и действительной глубиной проникновения происходит в результате влияния многократного рассеяния электронов на их глубину проникновения. Под влиянием многократного рассеяния происходит увеличение действительной длины пути электрона в веществе, причем это увеличение тем больше, чем выше порядковый номер атомов тормозящего вещества.

Интенсивность рассеяния электронов в кристаллах щелочно-галогидных солей характеризуется обратным и боковым рассеянием электронов (рис. 9—13).

Вклад в общую величину глубинной дозы обратно рассеянными электронами возрастает при увеличении порядкового номера атомов тормозящего вещества, в то время как глубина проникновения электронов уменьшается. Таким образом, увеличение дозы по глубине кристаллов, вызванное обратно рассеянными электронами, характеризует интенсивность рассеяния электронов в кристаллах различного химического состава.

Обратное и боковое рассеяние электронов приводит к утечкам энергии электронного пучка облучаемого образца. Величину этих утечек в каждом конкретном случае можно определить исходя из экспериментальных данных по обратному и боковому рассеянию электронов и зависимостей распределения доз по глубине кристаллов.

### Заключение

Исследованы потери энергии электронного пучка в кристаллах щелочно-галогидных солей. Определена глубина проникновения в кристаллах различного химического состава и измерено распределение энергии электронного пучка по глубине и в плоскости кристаллов. Показано, что степень проникновения электронов в облучаемый образец определяется не только средними потерями энергии на единице пути, но также интенсивность рассеяния, причем с ростом порядкового номера атомов тормозящего вещества рассеяние оказывает все большее влияние на распределение электронного пучка в облучаемом образце. Получены конкретные данные по распределению поглощенной энергии излучения электронного пучка в кристаллах различного химического состава с учетом обратно рассеянных электронов. Найдено, что обратно рассеянные электроны вносят существенный вклад в глубинную дозу — до 27% для KJ, 16% для KBr, 8% для NaCl.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Бете., Ю. Ашкин. В кн. «Экспериментальная ядерная физика» под ред. Э. Сегре, т. 1, ИЛ, 1955.
2. Г. Гайтлер. Квантовая теория излучения. ИЛ, 1956.
3. G. Moliere. Zs. Naturf., **3a**, 78 (1948).
4. R. M. Sternheimer. Phys. Rev., **103**, 511 (1956).
5. H. Bethe. Phys. Rev., **89**, 1256 (1953).
6. D. O. Coldwell. Phys. Rev., **100**, 291 (1955).
7. H. Hall, et al., Phys. Rev., **115**, 632 (1959).
8. E. L. Coldwasser, F. E. Mills. Phys. Rev., **98**, 1763 (1955).
9. L. V. Spenser. Phys. Rev., **98**, 1597 (1955).
10. A. M. Hudson. Phys. Rev., **105**, 1, (1957).
11. G. Breitling. Forschr. Geb. Röntgen, **88**, 83 (1958).
12. J. S. Laughlin, et al., Radiology, **60**, 165 (1953).
13. W. Z. Bothe. Naturforsch., **5a**, 8 (1950).
14. K. A. Wright, I. Trump. J. Appl. Phys., **31**, 1483 (1960).
15. J. Holliday, E. J. Sternglass. J. Appl. Phys., **28**, 1189 (1957).
16. J. Trump, R. Vande Graat. Phys. Rev., **75**, 44 (1949).
17. O. Halpern, H. Hall. Phys. Rev., **73**, 477 (1948).