



ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ПУЧКА МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 0.1 кэВ – 1.0 ГэВ

Н.Н. Михеев

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Ленинский проспект, д.59, 119333, г. Москва, Россия*

2021

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Решение прямой задачи по аналитическому описанию зависимости тормозной способности вещества для пучка моноэнергетических протонов в широком диапазоне первичной энергии заряженных частиц.

В качестве базовой концепции использовать модель статистики, разработанную в [1-3], и основанную на учете дискретной природы процессов многократного рассеяния заряженных частиц в слое вещества.

1. Провести детальный учет зависимости энергетических потерь частиц от их скорости в четырех различных энергетических диапазонах.
2. Провести сопоставление проводимых расчетов с известными из научных публикаций экспериментальными измерениями тормозной способности для бериллия, углерода, алюминия, кремния и серебра.

-
1. Михеев Н.Н. // Известия РАН, сер. физическая. 2000, Т. 64, №11, С. 2137.
 2. Михеев Н.Н., Степович М.А., Юдина С.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. №3. С. 53.
 3. Михеев Н.Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010, №4, С. 25.

БАЗОВАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОЙ ЭНЕРГИИ E_p ПУЧКА ПРОТОНОВ, ПРОШЕДШИХ ТОНКУЮ ПЛЕНОЧНУЮ МИШЕНЬ

$$\frac{m_e}{M_p} (E_0^2 - E_p^2) = n \times \frac{J^2}{4} \times \ln \left[\frac{k}{e^{k/n}} \right]. \quad (1)$$

где:

$$n = \frac{8\pi q^4 N_0 Z x}{J^2 \sqrt{1-\beta^2}} \times F_M^N.$$

$$k = \begin{cases} n, & \text{при } n \times \varepsilon_p(1) < m_e V_0^2; \\ \frac{m_e V_0^2}{\varepsilon_p(1)}, & \text{при } n \times \varepsilon_p(1) \geq m_e V_0^2. \end{cases}$$

$$\varepsilon_p(1) = \begin{cases} \frac{J^2}{4m_e V_0^2}, & \text{при } \frac{J^2}{4m_e V_0^2} < \varepsilon_{li}; \\ \varepsilon_{li}, & \text{при } \frac{J^2}{4m_e V_0^2} \geq \varepsilon_{li}. \end{cases}$$

$$F_M^N = \begin{cases} 2.314167 \left\{ 1 - \exp \left[-0.1714 \left(\frac{m_e V_0^2}{\varepsilon_{z/2}} \right)^{1/2} \right] \right\}, & \text{при } \frac{m_e V_0^2}{\varepsilon_{z/2}} < 11; \\ 1, & \text{при } \frac{m_e V_0^2}{\varepsilon_{z/2}} \geq 11. \end{cases}$$

Здесь: m_e и M_p – масса покоя электрона и протона; q – заряд электрона; N_0 – плотность атомов мишени; Z – атомный номер; e – основание натуральных логарифмов; $\varepsilon_p(1)$ – вероятная однократная потеря энергии; J – усредненное определенным образом значение средней потенциальной энергии атомных электронов мишени [9]; $m_e \times V_0^2$ – максимально возможное значение однократной потери энергии; $k = m_e \times V_0^2 / \varepsilon_p$ – максимальное число независимых однократных потерь энергии протонов; ε_{li} – минимальная энергия связи атомных электронов (равная первому ионизационному потенциалу в диэлектриках или энергии Ферми в металлах); $\varepsilon_{z/2}$ – минимальная энергия связи атомных электронов на границе области экранирования модели Томаса-Ферми. Функция F_M^N – описывает уменьшение вероятности неупругого рассеяния протонов на атомных электронах мишени и, соответственно, уменьшение среднего числа n взаимодействий, когда скорость частиц становится сопоставимой со скоростью атомных электронов, средняя энергия связи которых $\varepsilon_{z/2}$,

Таблица 1. Сравнение рассчитанных по формуле (1) значений вероятных потерь энергии ΔE_p^{calc} пучка протонов, прошедших тонкие пленки кремния с результатами экспериментальных измерений ΔE_p^{exp} работ: *Maccabee H.D., Raju M.R., Tobias C.A. // Phys. Rev. 1968, Vol. 165, No. 2, P. 469.* и *Bak J.F., Burenkov A., Peterson J.B.V. et al. // Nucl. Phys. B.1087, Vol. 288, P. 681.*

№/ №	E_0, ГэВ	x, мкм	n	$(1 - \beta^2)^{-1/2}$	$\varepsilon_p(1)$, эВ	$m_e V^2$, кэВ	ΔE_p^{calc}, кэВ	ΔE_p^{exp}, кэВ
1.	0.73	463.5	606240	1.7780	0.01995	349.44	155.9	156.6 ± 1.6
2.	0.73	1772.5	2318303	1.7780	0.01995	349.44	658.3	658.6 ± 6.6
3.	2.0	32.0	41853	3.1316	0.01519	459.0	6.86	7.0 ± 0.14

Величина тормозной способности $S = \frac{1}{N_0} \times \frac{d\Delta E_m}{dx}$ материала для пучка заряженных частиц зависит от их электрического заряда и скорости частиц. По отношению к скорости протонов выделяются четыре энергетических диапазона, в каждом из которых

формула (1) приобретает более конкретный и простой вид.

- **Первый энергетический диапазон:** от 1.0 ГэВ до $E_{01} = M_p/m_e \times J^2/8\varepsilon_{1i}$.

$$S = \frac{2\pi q^4 Z}{m_e V_0^2} \times \ln \left[\frac{4(m_e V_0^2)^2}{J^2 \sqrt{1-\beta^2}} \right].$$

- **Второй энергетический диапазон:** от $E_{01} = M_p/m_e \times J^2/8\varepsilon_{1i}$ до $E_{02} = 5.5 \varepsilon_{Z/2} \times M_p/m_e$.

$$S = \frac{2\pi q^4 Z}{m_e V_0^2} \times \ln \left[\frac{m_e V_0^2}{\varepsilon_{1i} \sqrt{1-\beta^2}} \right].$$

- **Третий энергетический диапазон:** от $E_{02} = 5.5 \varepsilon_{Z/2} \times M_p/m_e$ до $E_{03} = 0.5 \varepsilon_{1i} \times e \times M_p/m_e$.

$$S = \frac{2\pi q^4 Z}{m_e V_0^2} F_M^N \times \ln \left[\frac{m_e V_0^2}{\varepsilon_{1i} \sqrt{1-\beta^2}} \right].$$

- **Четвертый энергетический диапазон:** от $E_{03} = 0.5 \varepsilon_{1i} \times e \times M_p/m_e$ до 1.0 кэВ.

$$S = 0.184 \times \frac{4\pi q^4 Z}{\varepsilon_{1i}} F_M^N.$$

В этом энергетическом диапазоне, из-за малых значений показателя степени экспоненты, функция F_M^N может быть представлена в более упрощенном виде как:

$$F_M^N = 0.561 \times V_0 / V_{Z/2},$$

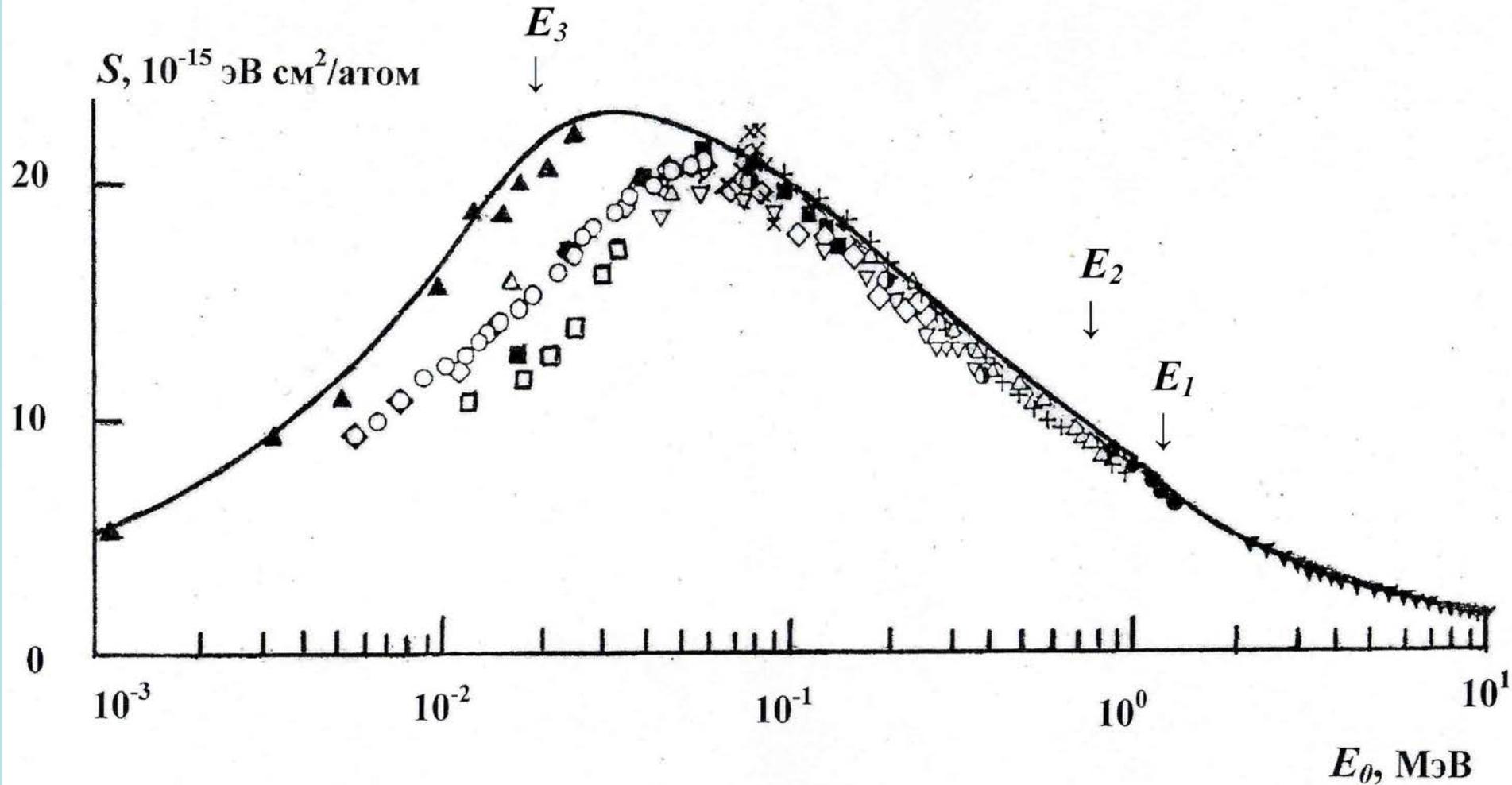
где $V_{Z/2}$ – скорость выше указанных атомных электронов.

Поэтому тормозная способность вещества для частиц с такой энергией будет функционально зависеть от скорости протонов по линейному закону: $S \sim V_0$, что является давно и хорошо установленным экспериментальным результатом.

Зависимость S алюминия для пучка протонов с энергией 1 кэВ - 10 МэВ:

сплошная кривая – расчет по полученным в работе формулам ($J = 161$ эВ, $\varepsilon_{11} = 5.6$ эВ и $\varepsilon_{Z/2} = 77$ эВ);

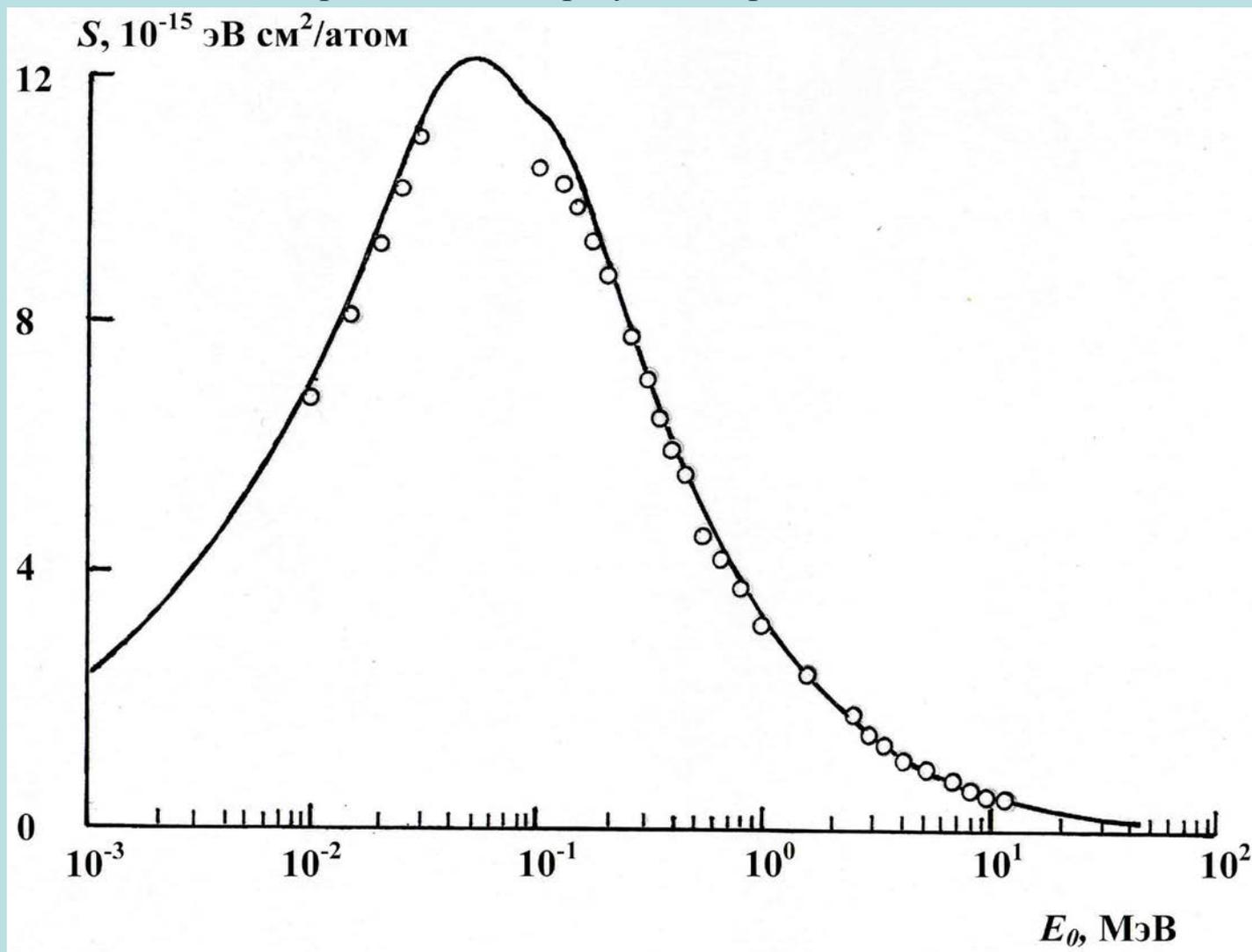
символы: \circ , Δ , \square , \blacktriangle , \blacksquare , \times , $+$ и \blacktriangledown – экспериментальные результаты различных исследователей (\blacktriangle – результаты из работы Архипова – Готта).



Зависимость S бериллия для пучка протонов с энергией 1 кэВ - 40 МэВ:

сплошная кривая – расчет по полученным в работе формулам ($J = 63$ эВ, $\varepsilon_{1i} = 10.32$ эВ
и $\varepsilon_{Z/2} = 10.32$ эВ);

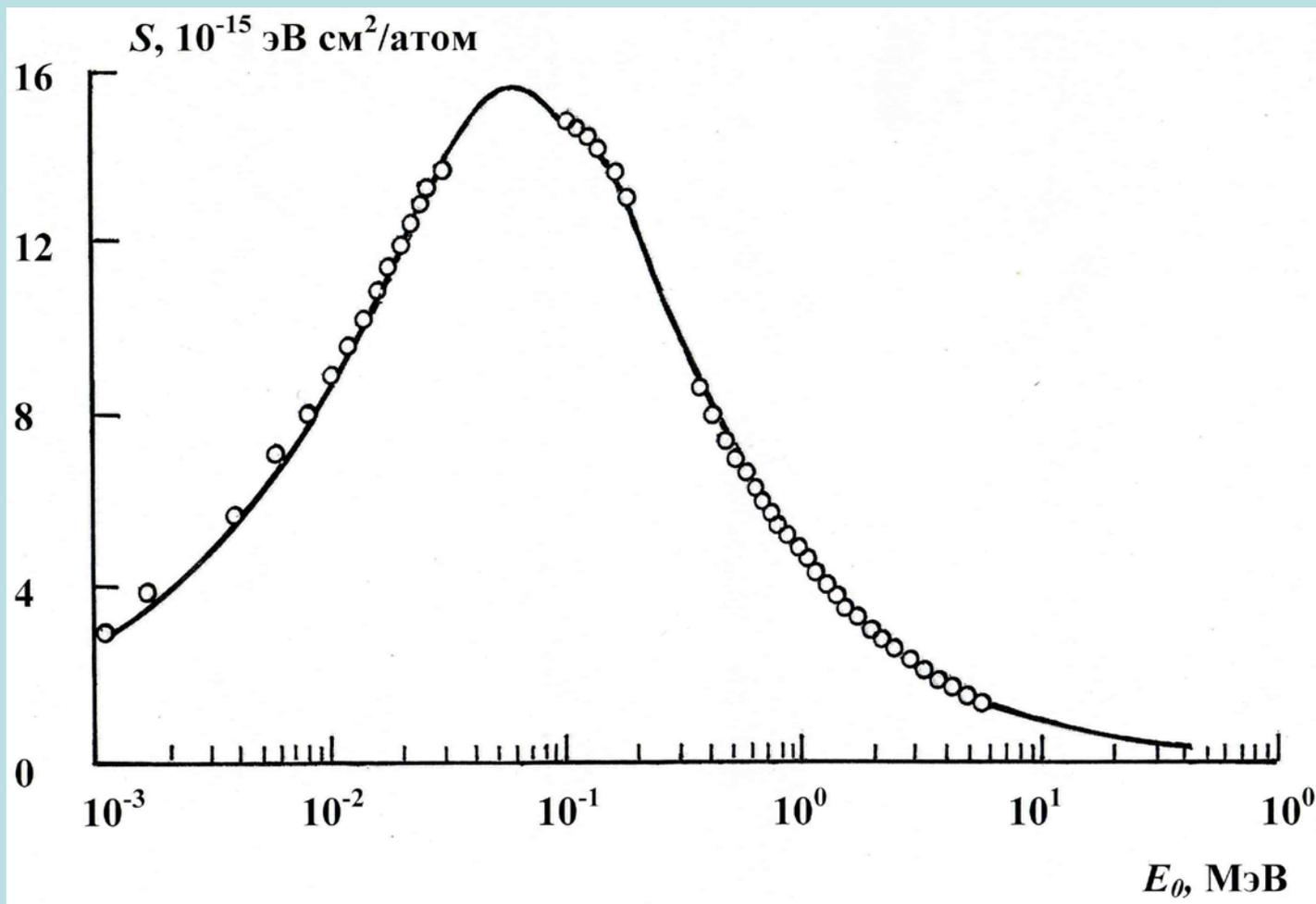
символ: \circ – экспериментальные результаты различных исследователей.



Зависимость S углерода для пучка протонов с энергией 1 кэВ - 40 МэВ:

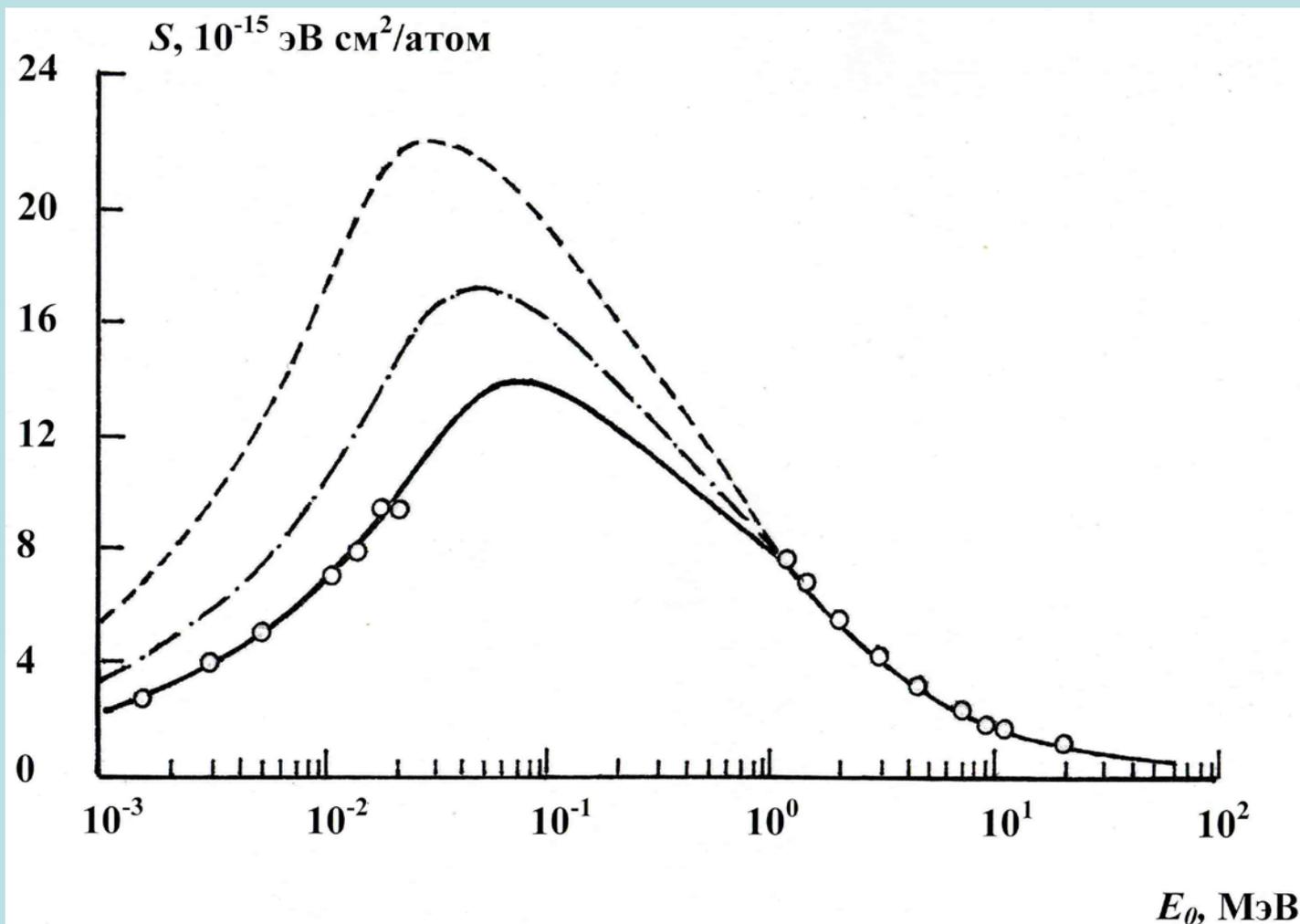
сплошная кривая – расчет по полученным в работе формулам ($J = 63$ эВ, $\varepsilon_{1i} = 10.32$ эВ и $\varepsilon_{Z/2} = 13$ эВ);

символ: \circ – экспериментальные результаты различных исследователей
(при $E_0 \leq 30$ кэВ, \circ – результаты из работы Архипова – Готта).



Зависимость S кремния для пучка протонов с энергией от 1 кэВ до 60 МэВ:

- сплошная кривая – расчет по полученным в работе формулам ($J = 167$ эВ, $\varepsilon_{1i} = 12.0$ эВ и $\varepsilon_{Z/2} = 106.0$ эВ);
- штрих-пунктир – расчет по полученным в работе формулам ($\varepsilon_{1i} = 8.0$ эВ);
- пунктир – расчет по полученным в работе формулам ($\varepsilon_{1i} = 5.0$ эВ);
- \circ – экспериментальные результаты различных исследователей (при $E_0 \leq 30$ кэВ, \circ – экспериментальные результаты из работы Архипова – Готта).

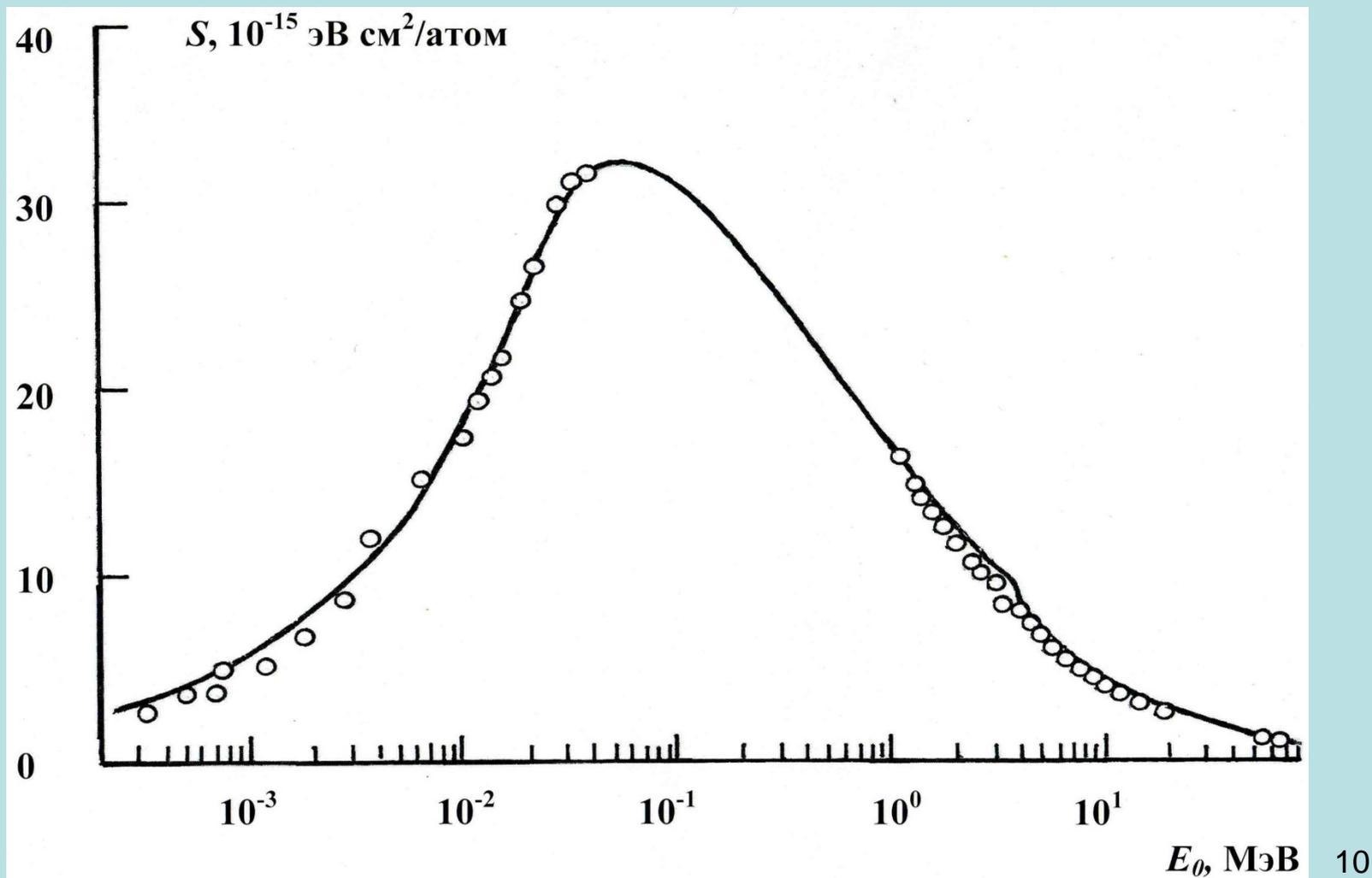


Зависимость S серебра для пучка протонов с энергией от 1 кэВ до 80 МэВ:

сплошная кривая – расчет по полученным в работе формулам ($J = 468$ эВ, $\varepsilon_{11} = 8.3$ эВ и $\varepsilon_{Z/2} = 367$ эВ);

символ: \circ – экспериментальные результаты различных исследователей (при $E_0 \leq 30$ кэВ,

\circ – экспериментальные результаты из работы Готта – Тельковского).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В результате проведенных исследований решена задача аналитического описания зависимости тормозной способности вещества от энергии для пучка моноэнергетических протонов в широком диапазоне первичной энергии частиц.
- Получены формулы по учету влияния зависимости энергетических потерь частиц от их скорости в четырех различных энергетических диапазонах.
- Проведена их апробация по результатам сопоставления проведенных для протонов расчетов с известными из научных публикаций экспериментальными измерениями тормозной способности бериллия, углерода, алюминия, кремния и серебра.
- Показана возможность диагностики свойств материала облучаемого протонами мишени на основе решения обратной задачи, а именно: путем сравнения результатов расчетов и измерений тормозной способности для низкоэнергетических протонов.

ПЛАКІТКА ЗА ВНИМАННЯ!