

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 53.05

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГА ИОНИЗАЦИИ
ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ТРАВЛЕНИИ ТРЕКОВ
ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ**

Е. Н. Старкова, Н. И. Старков

В работе предложен алгоритм определения порога ионизации, выше которого возможно появление треков при травлении следов тяжёлых ядер в твердотельных диэлектрических детекторах.

Ключевые слова: порог ионизации, травление треков, твёрдотельные детекторы.

Твёрдотельные диэлектрические материалы много лет используются в качестве детекторов заряженных частиц для определения их зарядов и энергий. При прохождении заряженной частицы через вещество вдоль её траектории создаётся область повреждений с поперечным размером до десятков нанометров в зависимости от свойств частицы. Эти области имеют скорость растворения намного больше, чем скорость растворения неповреждённого материала. Таким образом, в результате травления в образцах возникает полый канал, размер которого может достигать десяти микрон и более и который можно увидеть в оптический микроскоп. Диэлектрические твёрдотельные детекторы обладают пороговым поведением, т.е. травимые треки, видимые в оптический микроскоп, возникают только, если ионизационные потери в материале превышают некоторую величину D – порог, величина которого зависит от материала. На рис. 1 показаны ионизационные потери нескольких ядер в оливине, посчитанные в программном комплексе SRIM [1]. Величина порога, составляющая $D = 18 \pm 2$ МэВ/(мг · см⁻²), показана горизонтальными линиями. Важно отметить, что для определённого ядра по правой ветви кривой на рис. 1(а) можно определить максимальную величину энергии, при которой возможно появление травимого трека. Кроме того, максимальную длину пробега $L_{\max}$ можно определить по кривой ионизационных потерь в зависимости от пробега (рис. 1(б)), как расстояние между её ветвями на уровне порога ионизации. Так, для криптона максимальная энергия, при которой ещё возможен травимый трек, равна $E_{\max} = 30$ МэВ/нуклон, а максимальная длина протравленного трека $L_{\max} = 250$ мкм.

Кривые ионизационных потерь пересекают линию уровня D и со стороны низких энергий. Поэтому протравленный канал не достигает конца трека. До него остаётся 2–3 мкм так называемого дефицита трека.

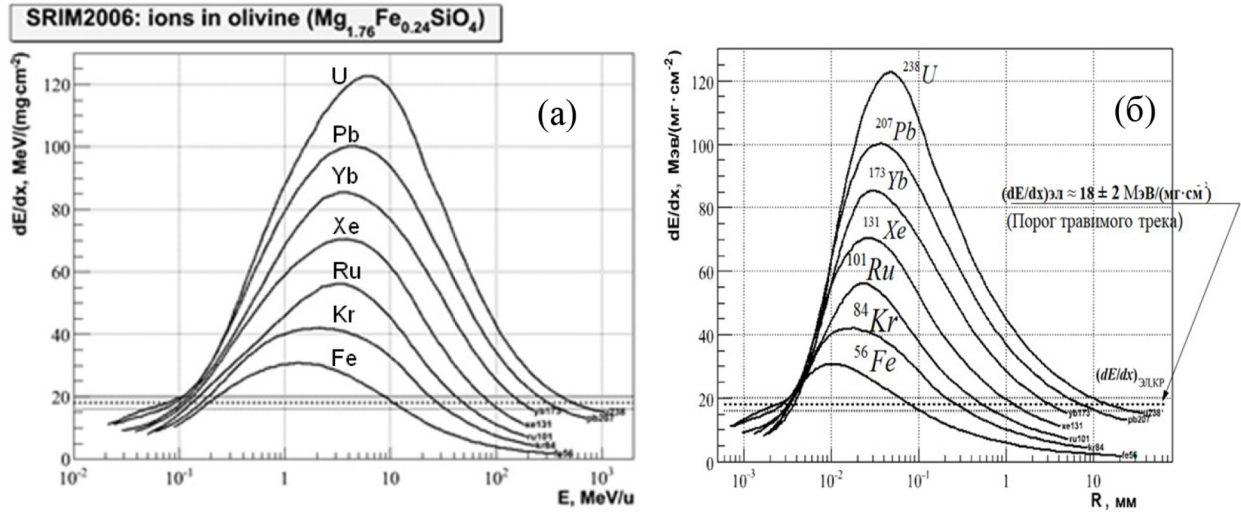


Рис. 1: Ионизационные потери ядер в оливине как функция энергии (а) и пробега (б). На рис. 1(б) обозначен порог ионизации $18 \text{ МэВ}/(\text{мг} \cdot \text{см}^{-2})$.

ЛЭЧ много лет использует твёрдотельные диэлектрические детекторы для определения характеристик ионов [2] – эксперимент ОЛИМПИА. В частности, были исследованы оливины из метеоритов с целью построить зарядовое распределение галактиче-

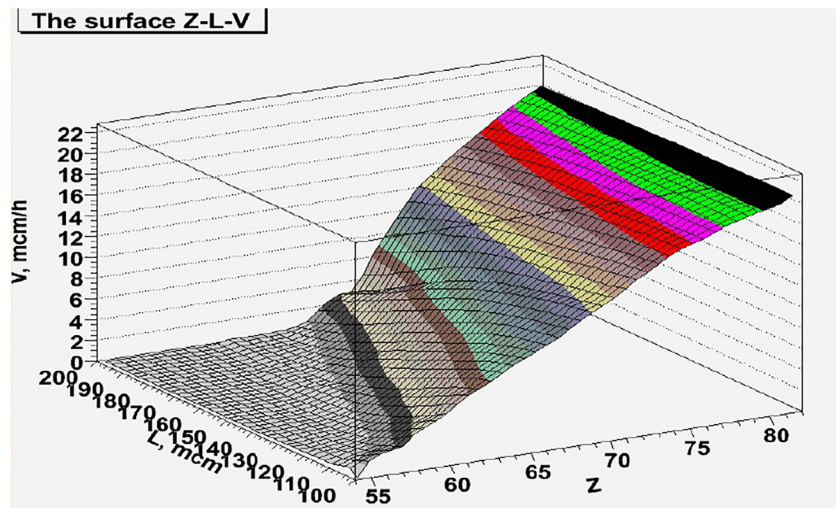


Рис. 2: Поверхность $V_{tr}(Z, L)$ для оливины.

ских ядер по характеристикам травления, т. е. по длине трека и скорости его травления. Для получения связи заряда с характеристиками травления – длиной трека L и скоростью травления V_{tr} , были проведены калибровочные эксперименты, по результатам которых была построена поверхность $V_{tr}(L, Z)$ (рис. 2).

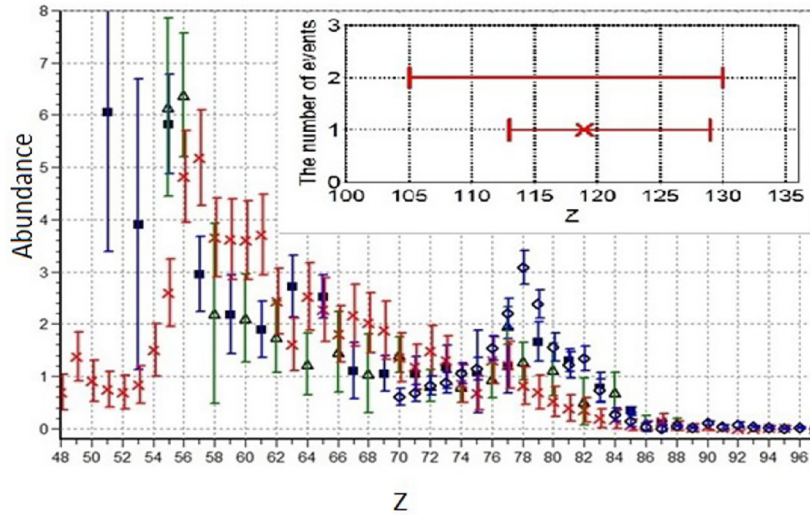


Рис. 3: Спектр галактических ядер по результатам нескольких экспериментов: ОЛИМПИА (кресты), НЕАО-3 (квадраты) [3], ARIEL-6 (ромбы) [4] и UHCRE (круги) [5]. Во вставке результат по трём сверхтяжёлым ядрам с оценкой заряда $Z = 119_{-6}^{+10}$.

В результате травления треков в кристаллах оливина из метеоритов было найдено более 26000 треков галактических ядер. Путём двойной интерполяции функции $V_{tr}(L, Z)$ по характеристикам травления – длине протравленного трека и его скорости травления, было получено зарядовое распределение галактических ядер (рис. 3). Кроме того, найдены три сверхдлинных трека – кандидаты в сверхтяжёлые элементы. Оценка их заряда дала величину $Z = 119_{-6}^{+10}$.

Представленная выше методики была распространена на разработку диэлектрического детектора на основе слюды для регистрации осколков деления синтезированных сверхтяжёлых ядер в условиях высоких температур [3]. С этой целью предварительно были проведены калибровочные эксперименты, в частности, девять образцов слюды были облучены ядрами Ag, Kг и Хе при трёх энергиях и протравлены. Результаты травления для Хе и Кг показаны на рис. 4.

Однако для Ag был получен неожиданный результат. При всех трёх энергиях – 175, 230 и 390 МэВ, длина трека оказалась одинаковой – 30 мкм при том, что оценки

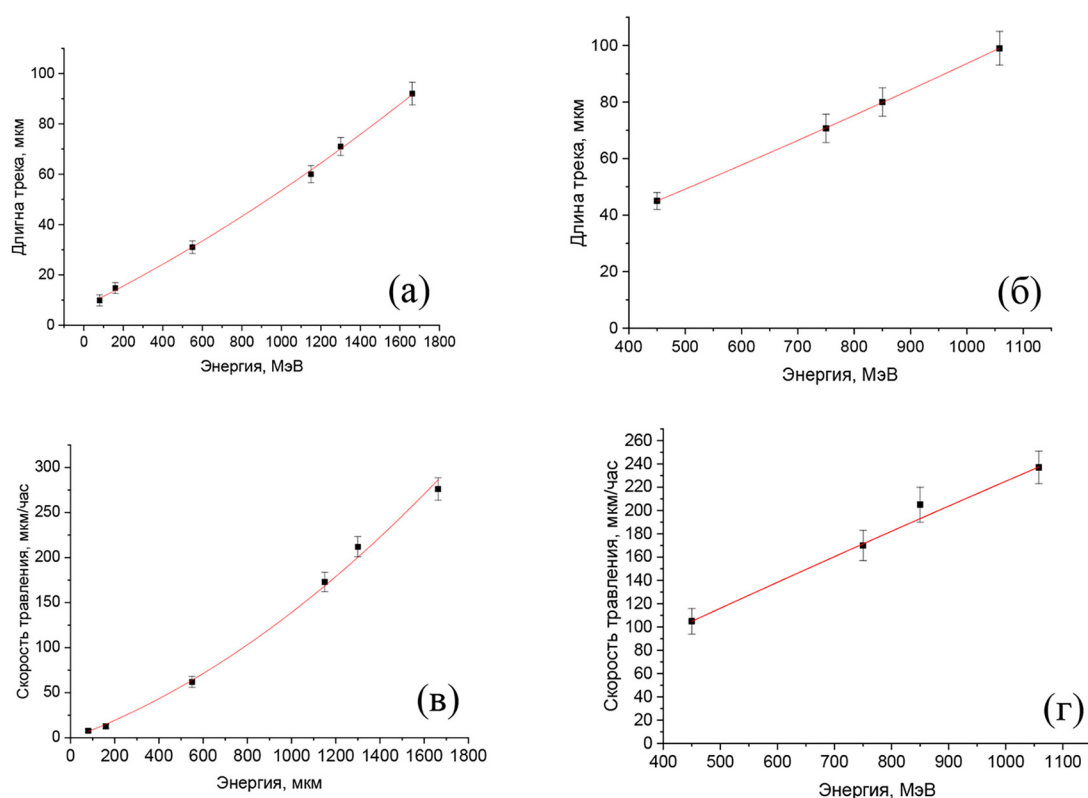


Рис. 4: Зависимость длины трека от энергии для Xe (а) и Kr (б). Зависимость скорости травления от энергии ядра для Xe (в) и Kr (г).

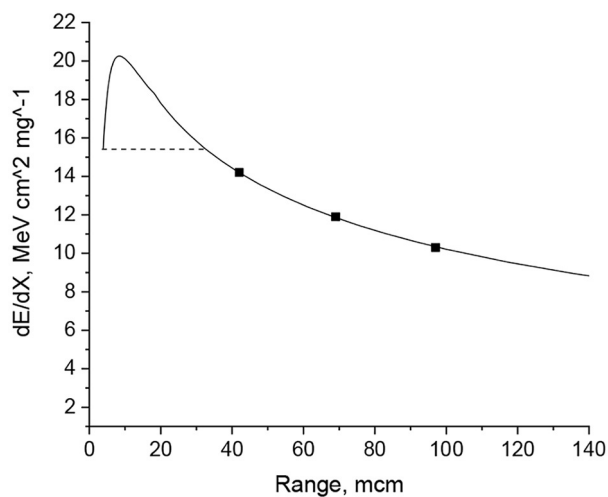


Рис. 5: Зависимость ионизационных потерь аргона в флюорспаре от пробега (штриховой линией отмечен порог ионизационных потерь, приводящих к травимому треку).

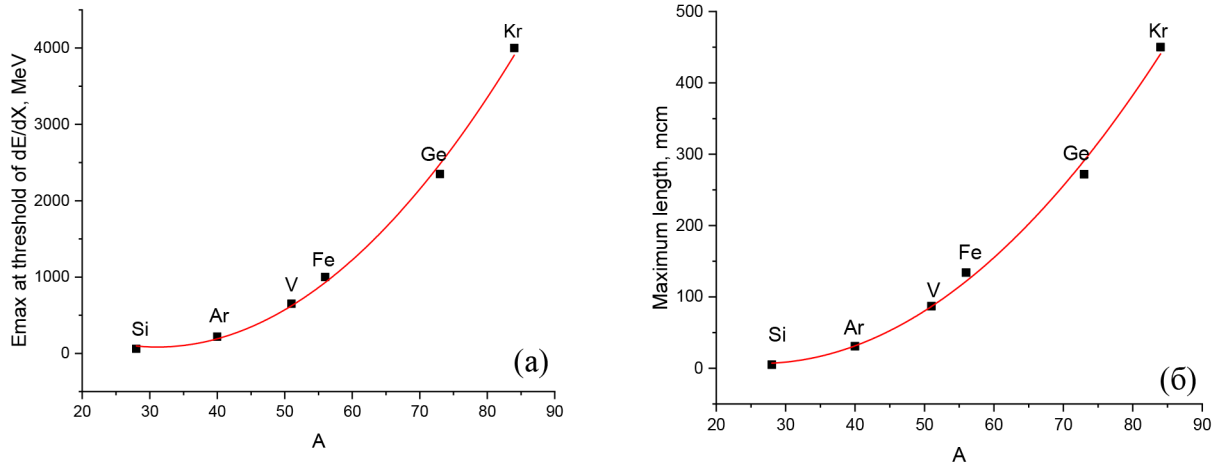


Рис. 6: $E_{\max}$ (a) и $L_{\max}$ (б) как функции атомного веса A .

по программе SRIM [1] дают величины пробега 50, 75 и 130 микрон, соответственно. На рис. 5 показана зависимость ионизационных потерь аргона в слюде от пробега, а также отмечены пробеги для аргона, полученные с помощью программы SRIM. Независимость длины трека от энергии можно объяснить, если предположить, что при выбранных энергиях облучения величина ионизационных потерь лежит ниже порога и 30 мкм – это максимально возможная длина травимого трека аргона в слюде. Как указывалось в начале статьи, в этом случае порог ионизации D расположен на таком уровне, когда расстояние между ветвями кривой ионизационных потерь как функции длины трека равно 30 микрон. На рис. 5 видно, что такому уровню соответствует $D = 15.5 \pm 0.5$ МэВ/(мг·см⁻²).

Используя полученную оценку порога, для определённого ядра можно сделать оценку того, начиная с какой энергии $E_{\max}$ появляются травимые треки у других ядер, и какова максимальная длина их треков. На рис. 6(a) показана зависимость энергии $E_{\max}$ от атомного веса ядра, аппроксимированная параболой. Ядра, чьи энергии лежат ниже этой кривой, дают травимые треки при облучении слюды. Ядро кремния имеет максимум ионизационных потерь вблизи порога $dE/dX = 15$ MeV/(мг·см⁻²). Более лёгкие ядра не дают травимый трек. На рис. 6(б) показана зависимость максимальной длины трека $L_{\max}$ в слюде для нескольких ядер также аппроксимированная параболой.

Применённый в данной работе подход определения порога можно рассматривать, как метод определения порогов ионизации для разных диэлектрических материалов. Для этого необходимо облучить образцы ядром с энергиями, предположительно большими, чем максимально возможные для данного материала и ядра, и найти вариант,

когда длина трека L при разных энергиях будет одна и та же. Тогда по кривой ионизационных потерь как функции пробегов можно установить порог ионизации, найдя такой уровень потерь, когда расстояние между ветвями кривой будет равно L .

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. F. Ziegler, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **219–220**, 1027 (2004).
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.208>.
- [2] V. Alexeev, A. Bagulya, M. Chernyavsky, et al., Astrophys. J. **829**, 120 (2016). DOI: 10.3847/0004-637X/829/2/120.
- [3] W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner, et al., The Astrophysical Journal **346**, 997 (1989).
- [4] D. O’Sullivan, A. Thompson, C. Domingo, et al., Nuclear Tracks and Radiation Measurements **15**, 673 (1988).
- [5] J. Donnell, A. Thompson, D. O’Sullivan, et al., Astrophys. J. **747**, 40 (2012).
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/1/40>.
- [6] E. Andreev, P. Apel, M. Chernyavsky, et al., Phys. Atom. Nuclei **88**, 758 (2025).
<https://doi.org/10.1134/S1063778825601167>.

Поступила в редакцию 3 июля 2026 г.

После доработки 18 августа 2026 г.

Принята к публикации 20 августа 2026 г.