

Парадокс чувствительности

В.А. Дитлов

НИЦ «Курчатовский Институт»

Б. Черёмушкинская ул. 25, 117218, Москва, Россия

e-mail: valery.ditlov@itep.ru

Любой твердотельный детектор можно представить как некоторый материал, состоящий из множества чувствительных микрообъемов, способных находиться в двух состояниях «Нет» или «Да». Локальным откликом детектора на воздействие радиации является переход чувствительного микрообъёма из состояния «Нет» в состояние «Да». Так, например, биоткань состоит из множества биоклеток, которые в результате воздействия могут перейти в инактивированное состояние «Да». В фотоэмульсии чувствительными микрообъёмами являются микрористаллы AgBr, закреплённые в инертной матрице желатины. Локальным откликом является создание в микрористалле центра проявления. В сплошных материалах, обрабатываемых процессом травления, каждая точка материала является чувствительным микрообъёмом. При воздействии радиации в этих точках создаются центры травления,

Также общим для всех твёрдотельных детекторов свойством является то, что воздействие на них любой радиации осуществляется через выбиваемый поток δ -электронов и при прохождении ионов в материале образуется латентный трек, состоящий из множества локальных откликов в некотором объёме вокруг оси трека. Латентные треки становятся видимыми после процесса визуализации, подбираемого для конкретного материала.

На основе подобия свойств Р. Катц объединил различные материалы в один класс ядерных твердотельных трековых детекторов (ЯТТД) и построил «Единую Теорию Треков» [1]. В этой теории используется модель многих ударов:

$$P_v^+(r) = \sum_{i=v}^{\infty} \frac{\xi(r)^i}{i!} e^{-\xi(r)} \quad (1)$$

Частота эффективных актов взаимодействий записывается в виде отношения дозы $D(r)$, выделенной в единице объёма детектора, к параметру D_{37} :

$$\xi(r) = \frac{D(r)}{D_{37}} \quad (2)$$

При выделении потоком δ -электронов дозы энергии D_{37} без локального отклика в состоянии «Нет» остаются 37% чувствительных микрообъёмов детектора с одноударным откликом. Эта величина характеризует чувствительность детектора - чем она меньше, тем чувствительнее детектор.

Таким образом, в подходе Р. Катца предполагается адекватность связи доза-эффект. Но эта адекватность не всегда имеет место [2-4].

Нам удалось в рамках модели многих ударов разработать также единый подход к ЯТТД [5], но в котором для получения вероятности появления локального отклика используется непосредственно дифференциальная функция теории многократного рассеяния электронов $f(\vec{\Omega}, \vec{\eta}, s)$:

$$P_v^+(\vec{r}) = 1 - \sum_{q=0}^N \frac{1}{q!} \sum_{l=1}^{v-1} l! \sum_{i=1}^l \bigcap_{j=1}^q \left(\frac{N \langle \xi^{k_{i,j}} e^{-\xi} \rangle}{(k_{i,j})!} \right) \cdot e^{-N\langle 1 \rangle} + e^{-N\langle 1-e^{-\xi} \rangle} \quad (3)$$

Где $\langle \xi^k e^{-\xi} \rangle = \int d\vec{\Omega} \int_{(\vec{\Omega} \cdot \vec{n}) < 0} (\vec{\Omega} \cdot \vec{n}) dQ \int \xi^k(\vec{\Omega}, \vec{\eta}, s) \cdot e^{-\xi(\vec{\Omega}, \vec{\eta}, s)} f(\vec{\Omega}, \vec{\eta}, s) ds;$ (4)

За величину частоты эффективного взаимодействия электронов с чувствительным микрообъёмом детектора принимается отношение:

$$\xi(s) = \frac{(dE(s)/ds)_{\omega_{cut}}}{(dE/ds)_0} \quad (5)$$

$$\xi(s) = \frac{(dE(s)/ds)_{\omega_{cut}}}{(dE/ds)_0} \quad (5)$$

:

В числителе (5) стоят ограниченные по ω_{cut} продольные потери δ -электрона, входящего в чувствительный микрообъём по направлению $\bar{\Omega}$ с остаточным пробегом s . Значение $(dE/ds)_0$ характеризует чувствительность отдельного микрообъёма – чем оно ниже, тем чувствительнее микрообъём детектора.

Таким образом, твердотельные трековые детекторы можно упорядочить двумя способами - по величине D_{37} и по $(dE/ds)_0$

Таблица 1. Упорядочение по чувствительности D_{37} , заданной по Катцу [5]

№№	Детекторы	D_{37} эрг/см ³	S см ²
1	2	3	4
1.	Кодак NTB-2	$3.5 \cdot 10^3$	$7.06 \cdot 10^{-10}$
2.	Минеральное масло на жидком сцинтилляторе с PPO	10^4	$7.06 \cdot 10^{-12}$
3.	Дрожжевые клетки	$1.3 \cdot 10^4$	$5.10 \cdot 10^{-07}$
4.	Ильфорд G-5	$4.0 \cdot 10^4$	$9.07 \cdot 10^{-10}$
5.	Ильфорд K-5	$5.0 \cdot 10^4$	$3.14 \cdot 10^{-10}$
6.	Ильфорд K-2	$7.0 \cdot 10^5$	$5.31 \cdot 10^{-10}$
7.	Стекло	$3.0 \cdot 10^6$	$3.14 \cdot 10^{-14}$
8.	Бактериальные споры O ₂	$5.1 \cdot 10^6$	$1.87 \cdot 10^{-09}$
9.	Бактериальные споры N ₂	$6.9 \cdot 10^6$	$1.85 \cdot 10^{-09}$
10.	Термолюминесцентный дозиметр LiF	$1.0 \cdot 10^7$	$3.14 \cdot 10^{-14}$
11.	Дозиметр Фрике	$1.0 \cdot 10^7$	$1.13 \cdot 10^{-12}$
12.	Ильфорд K-1	$1.3 \cdot 10^7$	$4.50 \cdot 10^{-10}$
13.	Бактериальные споры H ₂ S	$1.3 \cdot 10^7$	$1.80 \cdot 10^{-09}$
14.	Цитидин	$2.0 \cdot 10^7$	$3.13 \cdot 10^{-14}$
15.	α -Аланин	$2.0 \cdot 10^7$	$1.25 \cdot 10^{-13}$
16.	Ильфорд K-0	$2.4 \cdot 10^7$	$4.50 \cdot 10^{-10}$
17.	Твердые бактериофаги T ₁	$3.9 \cdot 10^7$	$1.20 \cdot 10^{-12}$
18.	Кристаллы NaI(Tl)	$4.0 \cdot 10^7$	$3.31 \cdot 10^{-13}$
19.	Твердые бактериофаги X-174	$5.0 \cdot 10^7$	$1.00 \cdot 10^{-12}$
20.	Аэрированный дозиметр Фрике	$5.0 \cdot 10^7$	$1.00 \cdot 10^{-12}$
21.	Твердые бактериофаги T ₁ [*]	$5.7 \cdot 10^7$	$1.13 \cdot 10^{-12}$
22.	Нитрат целлюлозы	$3.0 \cdot 10^8$	$9.07 \cdot 10^{-14}$
23.	β -галактозидаз	$3.0 \cdot 10^8$	$3.10 \cdot 10^{-13}$
24.	Лексан поликарбонат	$7.0 \cdot 10^8$	$1.26 \cdot 10^{-13}$
25.	Слюда	$3.0 \cdot 10^9$	$1.33 \cdot 10^{-12}$
26.	Трипсин	$3.6 \cdot 10^9$	$6.00 \cdot 10^{-14}$

Таблица 2. Упорядочение детекторов по чувствительности отдельной чувствительной области, [5]

№	Детекторы	$\xi_{r, \min}$	ξ 5.4 keV ⁻¹	$\frac{M \cdot B}{\left(\frac{dE}{ds}\right)_0 \text{ см}}$	$\frac{MeV \cdot cm^2}{g}$ $\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{ds}\right)_0$	a_0 нм
1	2	3	4	5	6	7
1	Стекло	750	1700	0.059	0.026	1
2	Термолюминесцентный дозиметр LiF	23.4	500	0.196	0.084	1
3	Цитидин	11.0	230	0.392	0.195	0.998
4	Кристаллы NaI(Tl)	7.20	129	8.25	2.16	3.25
5	Кодак NTB-2	3.20	57.0	1.54	0.399	150
6	α -Аланин	0.81	18.6	2.81	2.81	2
7	Дозиметр Фрике	0.536	12.2	7.05	4.03	6
8	Ильфорд K-5	0.510	9.0	9.80	4.99	100
9	Минеральное масло на жидком сцинтилляторе с PPO	0.453	13.3	3.72	4.37	15
10	Ильфорд G-5	0.221	3.9	22.6	5.93	170
11	Нитрат целлюлозы	0.118	2.31	17.0	17.0	1.7
12	Аэрированный дозиметр Фрике	0.110	2.46	35.2	17.7	5.64
13	Твердая бактериофага T-1	0.068	1.55	29.2	29.2	6.18
14	Твердая бактериофага OX-174	0.064	1.46	31.2	31.2	5.64
15	Оливин- ES	0.055	0.806	96.1	28.43	1.56
16	β -галактозидаз	0.050	1.13	60.0	39.9	3.14
17	Лексан поликарбонат	0.050	1.10	39.6	39.6	2.0
18	Твердая бактериофага T [*] -1	0.050	1.10	40.2	40.2	6
19	Ильфорд K-2	0.0258	0.455	195	51.2	130
20	Макрофоль KG	0.0194	0.101	111.2	91.9	8.18
21	Трипсин	0.0148	0.340	135	135	1.38
22	CR-39	0.0123	0.0876	90.7	70.42	
23	Ильфорд K-1	0.00136	0.024	3680	976	120
24	Ильфорд K-0	0.0007	0.013	6740	16200	120
25	Дрожжевые клетки	0.00048	0.011	4140	4130	4030
26	Бактериальные споры O ₂	0.00031	0.0071	6360	6360	244
27	Слюда	0.00025	0.0059	2460	749	6.51
28	Бактериальные споры N ₂	0.00025	0.0057	7920	7920	243
29	Бактериальные споры H ₂ S	0.00014	0.0031	14600	14600	234

Согласно же теории Р. Катца самым чувствительным детектором является ядерная фотоэмульсия.

Такое различие выглядит как парадокс чувствительности.

Этот парадокс разгадывается следующим образом. Действительно, δ -электроны на создание центров травления в стекле тратят меньшее количество энергии, чем их энергетические затраты на создание центра проявления в микрокристалле фотоэмульсии. Однако в стекле обнаружить отдельный центр травления чрезвычайно трудно. Радиус центра травления стекла меньше радиуса фотоэмульсионного кристалла AgBr в 160 раз, а площадь поперечного сечения центра в 25000 раз меньше соответствующего сечения микрокристалла.

Правда, размеры центров проявления микрокристаллов AgBr тоже намного меньше размеров микрокристаллов – они состоят всего из нескольких атомов металлического серебра, но которые инициируют во время проявления быструю экзотермическую химическую реакцию с выбрасыванием нити серебра из решётки AgBr. Эта нить образует клубок, наблюдаемый после проявления как фотоэмульсионное зерно [8].

В стекле нельзя визуализировать отдельный чувствительный микрообъём. Для проведения процесса травления необходимо, чтобы в состоянии отклика «Да» находилась доля микрообъёмов стекла больше некоторого порогового значения. Тогда плотность излучения должна быть тоже большой, т.к. размеры чувствительных микрообъёмов малы их количество в единице объёма велико и плотность радиации должна этому соответствовать. Поэтому значение D_{37} будет большой.

Различие между фотоэмульсиями и обрабатываемыми травлением детекторами отображается на связи измеряемых параметров треков ядер с пространственным распределением локальных откликов вокруг оси трека. Для измерения параметров треков в ядерной фотоэмульсии не нужно вводить какие-либо дополнительные параметры и достаточно воспользоваться сравнительно простой формулой Неттинга для оптической плотности на расстоянии x от оси горизонтального трека:

$$D(x) = n_0 \cdot \lg e \cdot \pi a_0^2 \cdot k \cdot \int_{-\sqrt{R_{\max}^2 - x^2}}^{+\sqrt{R_{\max}^2 - x^2}} P_v^+ \left(\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot dy \quad (8)$$

Здесь n_0 - число микрокристаллов в единице объёма, R_{\max} - максимальный поперечный размер латентного трека иона, y - вертикальная координата интегрирования по поперечному сечению трека. Высокочувствительные ядерные фотоэмульсии обладают одноударным откликом чувствительного микрообъёма $\nu=1$.

Для расчёта распределений локального отклика по объёму латентного трека в ЯТТД был разработан метод решения задач теории многократного рассеяния электронов. В работе [9] найден большой набор измеряемых параметров треков тяжёлых и сверхтяжёлых ядер без каких-либо калибровок, напротив, использовались давно известные регистрационные параметры ядерной фотоэмульсии из работы [6].

Связь между параметрами вытравленных треков ионов с распределением локальных откликов в детекторах, обрабатываемых процессом травления, гораздо сложнее. Для точного аналитического описания этой связи нужно решать сложные задачи по диффузии травителя и продуктов травления внутри вытравливаемых полостей, и задачи по движению фронта травления.

Другой альтернативой является разработка приближённых численных методов расчёта кинетики фронта травления [10] или ввод дополнительного порогового параметра для поперечного сечения латентного трека. Например, в работе [11] для треков ионов в оливи $\sigma_{vm}(R) = 2\pi \int_0^{\infty} P_v^+(\rho, R) \rho d\rho \geq \sigma_0 = 0.002693 \text{ mkm}^2$ цим уравнением: (9)

В работе [11] сначала из калибровки оливина на треках ядер группы железа было найдено пороговое значение поперечного сечения вытравливаемого трека σ_0 , а затем отыскивалась максимальная длина вытравливаемого трека, равная расстоянию между одинаковыми поперечными сечениями σ_0 , расположенными по разные стороны от максимального поперечного сечения трека. Вычисленная длина L_{\max} для иона урана в оливине оказалась равной 1160 мкм, полученное экспериментальное значение лежит в интервале 1100 – 1200 мкм.

Таблица 2. Упорядочение детекторов по чувствительности отдельной чувствительной области, [5]

№	Детекторы	$\varepsilon_{r\min}$	$\varepsilon_{5.4\text{ кэВ}}$	$\frac{M\text{эВ}}{ds}_0$	$\frac{MeV\cdot cm^2}{g}$	a_0 нм
1	2	3	4	5	6	7
1	Стекло	750	1700	0.059	0.026	1
2	Термолюминесцентный дозиметр LiF	23.4	500	0.196	0.084	1
3	Цитидин	11.0	230	0.392	0.195	0.998
4	Кристаллы NaI(Tl)	7.20	129	8.25	2.16	3.25
5	Кодак NTB-2	3.20	57.0	1.54	0.399	150
6	α -Аланин	0.81	18.6	2.81	2.81	2
7	Дозиметр Фрике	0.536	12.2	7.05	4.03	6
8	Ильфорд К-5	0.510	9.0	9.80	4.99	100
9	Минеральное масло на жидком сцинтиляторе с PPO	0.453	13.3	3.72	4.37	15
10	Ильфорд G-5	0.221	3.9	22.6	5.93	170
11	Нитрат целлюлозы	0.118	2.31	17.0	17.0	1.7
12	Аэрированный дозиметр Фрике	0.110	2.46	35.2	17.7	5.64
13	Твердая бактериофага Т-1	0.068	1.55	29.2	29.2	6.18
14	Твердая бактериофага OX-174	0.064	1.46	31.2	31.2	5.64
15	Оливин- ES	0.055	0.806	96.1	28.43	1.56
16	β -галактозидаз	0.050	1.13	60.0	39.9	3.14
17	Лексан поликарбонат	0.050	1.10	39.6	39.6	2.0
18	Твердая бактериофага Т*-1	0.050	1.10	40.2	40.2	6
19	Ильфорд К-2	0.0258	0.455	195	51.2	130
20	Макрофоль KG	0.0194	0.101	111.2	91.9	8.18
21	Трипсин	0.0148	0.340	135	135	1.38
22	CR-39	0.0123	0.0876	90.7	70.42	
23	Ильфорд К-1	0.00136	0.024	3680	976	120
24	Ильфорд К-0	0.0007	0.013	6740	16200	120
25	Дрожжевые клетки	0.00048	0.011	4140	4130	4030
26	Бактериальные споры O ₂	0.00031	0.0071	6360	6360	244
27	Слюда	0.00025	0.0059	2460	749	6.51
28	Бактериальные споры N ₂	0.00025	0.0057	7920	7920	243
29	Бактериальные споры H ₂ S	0.00014	0.0031	14600	14600	234

В колонках пунктиром выделены детекторы к которым применима теория Р. Катца для электронов в релятивистском минимуме ионизации и при энергии 5.4 кэВ.

Биоклетки оказались в конце таблицы!

Заключение

Из работы следует, что для сравнения чувствительности различных детекторов нужно учитывать ещё порог визуализации трека, которым, например, в случае работы с оливином [11] является пороговое поперечное сечение латентного трека σ_0 (9).

В работе [5] показано, что формулы Единой Теории Р. Катца [12]. являются частным случае формул нашего подхода, справедливых только в частном случае низкочувствительных детекторов когда:

$$\xi \ll 1 \quad (10)$$

По этому критерию анализ таблицы 2 показывает, что для энергий δ -электронов в релятивистском минимуме ионизации Единая теория треков Р. Катца применима только примерно к половине детекторов и лишь для электронов малой энергии в районе области 5.4 кэВ теория Р. Катца применима к 21 или 22 детекторам таблиц.

Биоклетки обладают самой высокой устойчивостью к действию радиации. Видимо, их жизнедеятельность направлена на то, чтобы максимально противодействовать внешнему воздействию.

Литература

1. Katz R. Unified track theory. – In: 7th Intern. Colloq. On Corpuscular Photography and visual solid detectors. Barcelona, 1970, pp. 1-29.
2. Jacobson L. and Rosander R. The energy loss concept applied to heavy ion track in nuclear emulsion. In. *Cosmic Ray Physics Report LUIP-CR-73-13*, 1973, November, Department of Physics University of Lund, LUND Sweden 23p. <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/05/127/5127887.pdf?r=1>
3. Jakes, J., Gais, P., Voigt, J., 1997. *Radiat. Meas.* 28(1-6), pp. 853-856. DOI: [10.1016/S1350-4487\(97\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(97)00197-2)
4. Иванов В.И. *Курс дозиметрии*. – М.: Атомиздат, 1978. – 392 стр.
5. Ditlov V.A. Theory of Spatial calculation of primary action of δ -electrons in track detectors with account of multiple scattering. – In: *Solid St. Nucl. Track Detectors*. Pergamon Press, Ltd., 1980, p.131-141.
6. Bogomolov K.S. La theorie fluctuatoire de l'action photographique des particules nucleares faiblement ionisantes. – In: *Ergebnisse der Int. Konferenz f. Wiss. Photographie*. Hellwich Koln, 1958, S.352-360.
7. K.I. Comber, J.S. Yadav, V.P. Singh and A.P. Sharma. Development of a better etchant for soda glass nuclear track detector. – In: *Solid St. Nucl. Track Detectors*. Pergamon Press, Ltd., 1980, p.165-170.
8. Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. – М.: ИЛ., 1962. – 424 стр.
9. В.А. Дитлов. Применение теории многократного рассеяния электронов для описания параметров треков быстрых тяжёлых и сверхтяжёлых ядер. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2025, т. 56, вып. 2, с. 783-796.
10. Ditlov V.A. Calculated Tracks in Plastics and Crystals. *Radiation Measurements*, 1995, 25, (1-4), pp. 89-94.
11. Ditlov V.A., Perelygin V.P., Stetsenko S.G., Track Parameters of Multicharged Particles in Crystalline Detectors. In *Proceedings of II International Workshop "SSNTD and their applications"*. 1993. Dubna. pp. 40-43.
12. Ditlov V. A. The Evolution of Track Theory throughout the History of the International Solid State Detector Conferences. *Radiat. Meas.* 2001. V. 34. P. 19–26.