

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ АКТИВНОСТИ «ГОРЯЧИХ» ЧАСТИЦ РАДИОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**В. К. Шинкаренко**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

Рассмотрена процедура радиографического определения малоактивных «горячих» частиц, включая определение параметров радиографических пятен, построение калибровочных зависимостей и фильтрацию ложных пятен. Установлено, что отклонение зависимости «активность «горячей» частицы - диаметр пятна» от степенной функции, наблюдаемое в области малых активностей, связано с особенностями формирования радиографического пятна малых размеров и не является достаточным основанием для предположений о дифференциации состава вещества «горячих» частиц в зависимости от их активности. При радиографическом определении активности «горячих» частиц рекомендовано использовать в качестве аппроксимирующей функции полином второй или третьей степени от логарифма интегральной оптической плотности пятна.

Интерес к изучению «горячих» частиц\* малой активности возник в связи с необходимостью учета их вклада в ингаляционные дозовые нагрузки. Известно, что относительно крупные частицы с аэродинамическим диаметром  $> 5 \div 8$  мкм\*\* оседают в верхних путях дыхательной системы, откуда эффективно удаляются, частицы же микронных и субмикронных размеров способны эффективно задерживаться. На сегодня, спустя 21 год после Чернобыльской аварии, удельная  $\beta$ -активность топлива, рассчитанная согласно данным [1], составляет  $2,37 \cdot 10^9$  Бк/г  $UO_2$ . Соответственно,  $\beta$ -активность топливной частицы диаметром 1 мкм, составляет 0,013 Бк, топливная частица с аэродинамическим диаметром 1 мкм имеет активность порядка 0,0004 Бк. Данная статья посвящена анализу ряда проблем, возникающих при радиографическом изучении частиц столь малых активностей.

Радиографические методы широко используются для визуализации «горячих» частиц и определения их активности, именно благодаря радиографии эти частицы и были впервые обнаружены [2]. В основе метода лежит образование пятен на фотоэмульсии под действием радиоактивного излучения изучаемых частиц. Сравнение параметров образовавшихся пятен и пятен от частиц известной активности, полученных в аналогичных условиях экспозиции и проявления, дает возможность оценить активность исследуемых частиц. При этом неявно предполагается, что размеры пятна преимущественно определяются активностью частицы и слабо зависят от других ее параметров, в частности от изотопного состава. Предполагается, также, что группа частиц с известной активностью, отобранная для калибровки, является представительной для данного набора частиц. Косвенным подтверждением соответствия отобранных «горячих» частиц предположению об однородности их состава служит факт расположения их пятен на общей калибровочной кривой. Общепринятым (см. ссылки в монографии [3] и работу [4]) в качестве такой кривой является использование степенной функции

$$A = \alpha \cdot d^\beta, \quad (1)$$

где  $A$  – активность частицы;  $d$  – диаметр пятна;  $\alpha$  и  $\beta$  – эмпирические коэффициенты. Однако при определении  $\beta$ -активностей «горячих» частиц микронных размеров по параметрам их пятен возникает ряд дополнительных проблем, рассматриваемых ниже. Целью данной работы является исследование применимости метода автордиографии для изучения

\* «Горячая» частица - это стабильное образование с удельной активностью значительно (несколько порядков) превышающей фоновый уровень.

\*\* Размерность аэродинамического диаметра традиционно дается в микрометрах, правильное значение -  $\text{мкм} \cdot \text{г}^{0,5} \cdot \text{см}^{-1,5}$ , поскольку  $d_{Ad} = d \sqrt{\rho}$ , где  $d$  - диаметр частицы, а  $\rho$  - ее плотность.

«горячих» частиц с малой активностью и поиск приемов для расширения возможностей данного метода.

### **Проблемы калибровки**

Как было показано [5, 6], в области малых активностей существуют отклонения от зависимости (1), вследствие чего ее экстраполяция в эту область представляется некорректной. Для построения калибровочной кривой в этой области нужны «горячие» частицы с известной активностью. Но измерение активности отдельной частицы на уровне  $0,01 \div 0,001$  Бк сопряжено с большими погрешностями (большие времена измерения из-за случайного характера распада, необходимость вычитания фона измерительного прибора, сравнимого с величиной активности частицы) [7]. Существенную неопределенность вносит также излучение подложки, на которой находится частица, поскольку «чисто» выделить частицу микронных размеров практически невозможно, остается только минимизировать это влияние.

### **Проблемы измерения малых пятен**

Пятна малых размеров не имеют четкой границы, при их измерении обычно [2, 6] задают уровень потемнения, на котором и определяют диаметр пятна. Понятно, что чем ниже выбранный уровень, тем меньшей активности частицу удастся обнаружить. Однако при этом растут случайные отклонения измеренных диаметров, связанные с флуктуациями фона, например вуали фотослоя. Желательно иметь измеримый параметр пятна, который был бы менее чувствителен к таким колебаниям.

### **Проблема фильтрации ложных срабатываний**

Авторадиограмма, кроме полезной информации, содержит также и шум - царапины, пылинки, вуаль, маркировки и т.п., которые могут быть восприняты в качестве ложных радиографических пятен. Так, уже сам фотографический слой имеет некоторую, допустимую по техническим условиям, плотность дефектов; во время работы с фотослоем их число возрастает. Необходимо выделить характерные особенности, присущие авторадиографическим пятнам, и с их помощью разработать алгоритм фильтрации.

### **Приборы и материалы**

Радиографические исследования воздушных фильтров, экспонированных в помещениях объекта «Укрытие» [8], проводили с использованием высокочувствительной медицинской рентгеновской пленки фирмы Agfa. Усиливающие экраны не применялись. Были использованы стандартные рецепты проявляющего (Рентген-2) и фиксирующего растворов. Цифровые денситограммы авторадиографических пятен получали путем сканирования рентгеновской пленки в режиме пропускания или отражения, для этого использовали сканер Epson Perfection 1670, разрешение 600 точек на дюйм.

Определение параметров пятен при заданном уровне почернения проводили с помощью пакета обработки изображений Image-Pro Plus 5.0.

Из воздушных фильтров после радиографии были вырублены кружочки, содержащие «горячие» частицы. После повторной радиографии были отобраны 11 высечек, содержащих только одну частицу и имеющих низкий уровень фоновой засветки. Бета-активности отобранных частиц, определенные с помощью низкофонового пропорционального счетчика LB-720 (Bekman), составили ряд: 0.1, 0.4, 0.56, 0.84, 1.3, 2.56, 8.0, 11.0, 21.4, 30.0 и 174 Бк. Из них и была сформирована линейка частиц известной активности.

Радиограммы этого набора частиц с различными временами экспозиции (5, 11, 20, 40 мин, 1.33, 2.67, 5.42, 18,5 ч, 1, 2, 4, 9, 16 сут) были получены путем смещения линейки на новое место того же листа фотопленки после каждой экспозиции, что позволило минимизировать отклонения, связанные с нестабильностью режима проявления.

В среде пакета Photoshop были смонтированы последовательности изображений одной и той же частицы, полученные с разными временами экспозиции. Это дало возможность исследовать диаметр пятна как функцию времени экспозиции для одной выбранной частицы.

Математическая обработка данных была выполнена в среде пакета Statistica-5.5.

### Полученные результаты и их обсуждение

Известно, что степень потемнения элемента объема фотографического слоя определяется поглощенной дозой фотоактиничного излучения. Изучение радиографических пятен в зависимости от числа распадов внутри активной частицы во время экспозиции дает возможность использовать линейку «горячих» частиц для получения калибровочного набора радиографических пятен малоактивных частиц с помощью простого уменьшения времени экспозиции. Этот прием способствует снижению погрешностей измерения, поскольку точность измерения отрезков времени существенно выше точности измерения активностей отдельных частиц. Разумеется, для корректного использования такого приема необходимо подтверждение того, что частицы состоят из однородного по своим свойствам материала и их отличия в активности связаны лишь с отличиями в количестве радиоактивного вещества. (Как было отмечено выше, это условие подразумевается при исследовании любой автордиограммы ансамбля частиц.)

На рис. 1 приведено изображение автордиограммы линейки частиц (а) (экспозиция 2 сут) и ряд последовательных радиограмм для одной частицы с активностью 30 Бк (б).

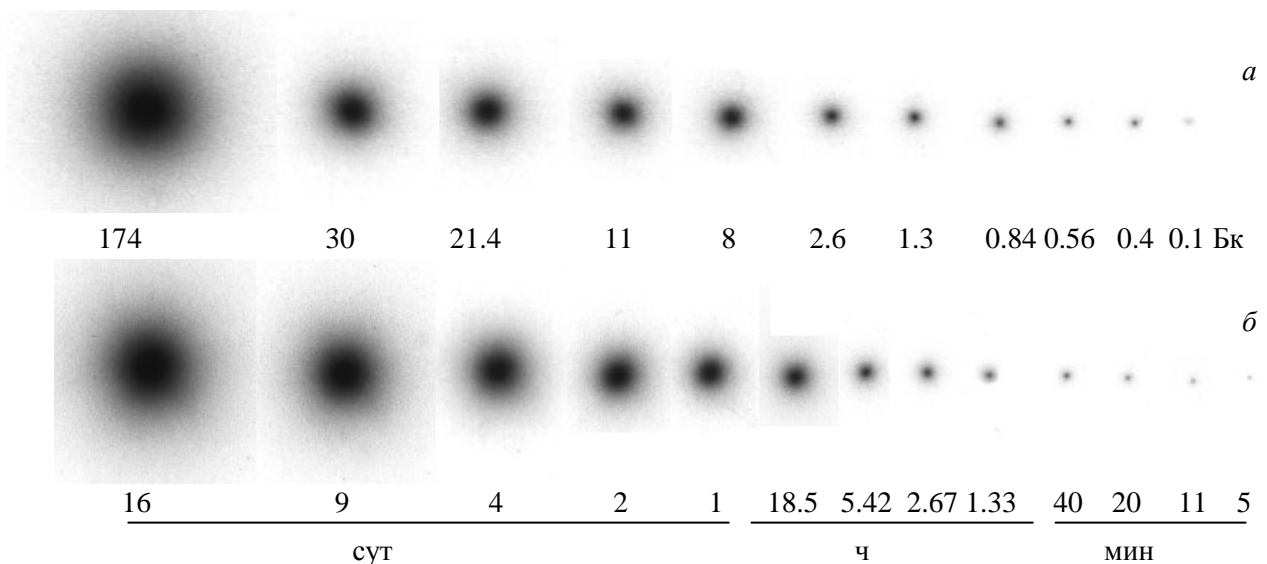


Рис. 1. Автордиограмма линейки частиц, экспонированной на протяжении 2 сут (а) и ряд автордиограмм одной частицы (30 Бк) при вариации времен экспозиции (б).

В качестве существенного аргумента против использования варьирования времени экспозиции для частиц чернобыльского происхождения может быть приведено отклонение калибровочной кривой от степенной зависимости (1) в области малоактивных частиц, обнаруженное авторами работы [5] и трактованное ими в пользу отличий изотопного состава частиц разной активности. Аналогичное отклонение было отмечено также в работе [6].

Рассматривая зависимости диаметра пятна от числа распадов (рис. 2) для линейки частиц (экспозиция 2 сут) и для одной частицы с активностью 30 Бк (экспозиция от 5 мин до 16 сут) видим, что все точки находятся вблизи линии, имеющей характерный излом в области малых экспозиционных доз. Следовательно, отклонение калибровочной кривой в области малых доз обусловлено не природой малоактивных «горячих» частиц, а особенностями формирования радиографического пятна малых размеров.

Эмпирическая зависимость вида (1) в свое время была предложена для аппроксимации наборов высокоактивных «горячих» частиц бомбового происхождения. По-видимому, предпосылкой для выбора этой функции была зависимость диаметра пятна от дозы в отсутствии поглощения  $d = k\sqrt{At}$ , откуда  $At = k_1d^2$ . В результате анализа совместного воздействия на фотослой  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения в работе [2] предложено более сложное выражение, из двух слагаемых, отдельно для  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов. При расширении диапазона активностей частиц следует ожидать отклонений от степенной функции (1), особенно в области малых активностей. Так, согласно (1) нулевой дозе соответствует нулевой диаметр пятна, тогда как в действительности нужна некоторая пороговая доза для создания почернения заданного уровня. Монотонный ход калибровочной кривой может нарушаться при переходе от модели «тонкой» фотоэмульсии ( $r \gg h$ ,  $r$  – радиус пятна,  $h$  – толщина эмульсии) к «толстой», когда  $r$  имеет значение порядка  $h$  или ниже. Отклонений следует ожидать также при образовании больших пятен, радиусы которых превышают длину пробега  $\beta$ -частиц в материале фотоэмульсии. Дальнейшее увеличение размеров пятна будет определяться только вкладом тормозного и  $\gamma$ -излучения «горячих» частиц. Еще один излом калибровочной кривой возможен в зоне выхода центра пятна на насыщение.

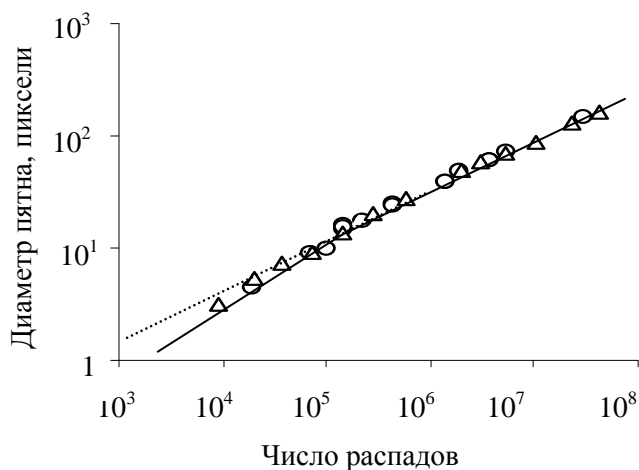


Рис.2. Зависимости диаметра радиографического пятна от числа распадов в «горячей» частице за время экспозиции.

○ - линейка частиц, 174 ÷ 0,1 Бк, экспозиция 2 сут;

Δ - частица 30 Бк, экспозиция 5мин ÷ 16 сут (1 пиксель ≈ 0,0423мм).

В ходе обработки радиограмм на уровне потемнения 25 (максимальное потемнение соответствует уровню 255, полная прозрачность – нулю) было обнаружено 106 автордиографических пятен при сканировании в режиме пропускания и 90 – в режиме отражения. С целью уточнения вида аппроксимирующей функции и выбора наиболее информативных параметров были определены минимальные, максимальные и средние диаметры зарегистрированных пятен, их площадь, минимальные, максимальные, средние и интегральные оптические плотности. Из этого набора были отобраны два параметра: средний диаметр пятна ( $d_{cp}$ ) и его интегральная оптическая плотность ( $I$ ). Последний параметр интересен тем, что на малых уровнях потемнения он слабее зависит от выбранной величины уровня регистрации, чем диаметр (рис. 3), что способствует снижению чувствительности к случайным флуктуациям фона.

При наличии достаточно большого количества экспериментальных точек зависимость числа распадов внутри частицы от интегральной оптической плотности пятна\* (рис. 4, а) или от его среднего диаметра (рис. 4, б) в билогарифмических координатах выглядит уже не ломаной, а плавной изогнутой линией. В обоих случаях наблюдается явное отклонение экспериментальных точек от прямо пропорциональной зависимости. Следовательно, лома-

\* Понятно, что на самом деле параметры пятна являются функцией числа распадов, однако для определения активности частицы по ее пятну, нужна именно обратная зависимость. Использование обратной функции удобно также для сравнения суммарных квадратичных отклонений при подгонке аппроксимирующих функций с разными аргументами.

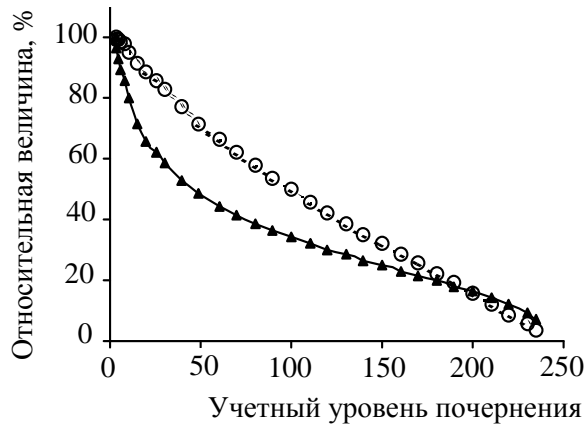


Рис. 3. Зависимость относительных значений диаметра и интегральной оптической плотности от величины учетного уровня почернения для одного и того же радиографического пятна (30 Бк, 16 сут).  
 ▲ - диаметр;  
 ○ - интегральная оптическая плотность.

ную линию на рис. 2 можно рассматривать в качестве кусочно-линейного приближения к точкам плавной кривой, ее необходимо заменить другой, более гладкой функцией. В качестве аппроксимирующих функций были испытаны полиномы до 5-й степени включительно. В табл. 1 приведены зависимости средних дисперсий  $\sigma^2$  экспериментальных точек от степени аппроксимирующего полинома. Значение  $\sigma^2$  находили согласно выражению

$$\sigma^2 = \frac{S_q}{\sqrt{N \cdot (N - k - 1)}} \quad (2)$$

где  $S_q$  - суммарное квадратичное отклонение;  $N$  - число аппроксимируемых точек;  $k$  - число степеней свободы,  $k = n + 1$ , где  $n$  - степень полинома. Видим, что для функции от интегральной оптической плотности пятну минимуму дисперсии соответствует кубический полином и полином 4-й степени, если аргументом является диаметр. С учетом малых отличий дисперсий при  $n = 3$  и  $n = 4$  для диаметров в качестве аппроксимирующей функции также был выбран кубический полином. Отметим, что с уменьшением объема выборки ( $N$ ) минимум дисперсии смещается в сторону полиномов меньшей степени. Использование квадратичного полинома от интегральной оптической плотности, для наших данных, предпочтительно при  $N < 16$  и при  $N < 8$ , если аргумент - диаметр.

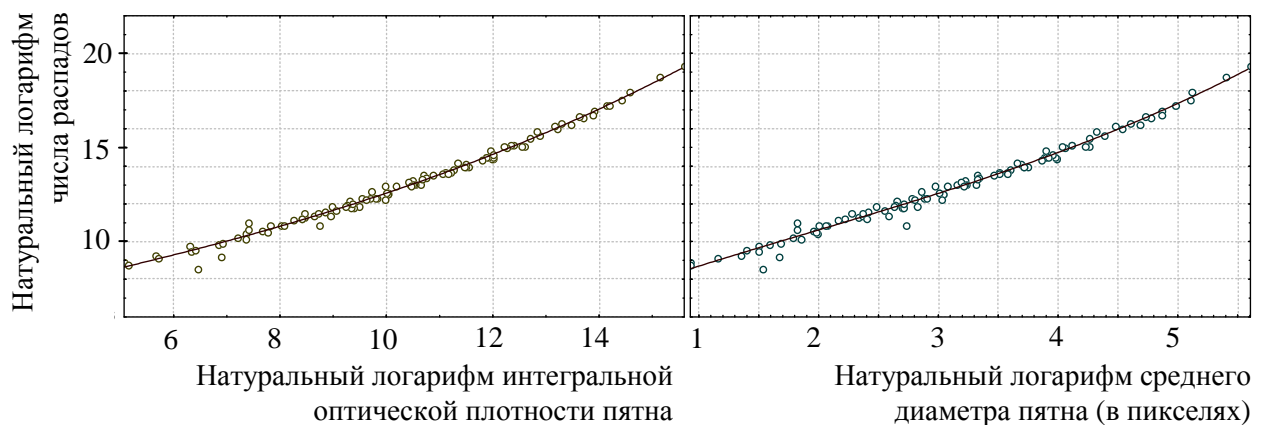


Рис. 4. Зависимость числа распадов внутри частицы от интегральной оптической плотности пятна (а) и от среднего диаметра пятна (б). Аппроксимирующие кривые - кубические полиномы, функции № 5 и № 4 из табл. 2 соответственно.

Тестированию на качество аппроксимации были подвергнуты пять функций, перечисленных в табл. 2. Значение константы  $c$ , соответствующее точке излома функции № 3, подбирали так, чтобы исключить разрыв в данной точке. Выполнить это условие для при-

ближения двумя экспонентами (функция № 2) не удалось, разрыв наблюдается во всем интервале значений, в качестве константы *c* было выбрано значение, соответствующее излому функции в логарифмических координатах (функция № 3).

Из представленных в табл. 2 результатов видно, что лучшей аппроксимирующей функцией является кубический полином в координатах логарифм числа распадов – логарифм

**Таблица 1. Зависимость средней дисперсии экспериментальных точек от степени аппроксимирующего полинома**

Степень полинома	Аргументы аппроксимирующего полинома	
	логарифм диаметра пятна	логарифм интегральной оптической плотности пятна
1	0,0776	0,0973
2	0,0397	0,0241
3	0,0355	0,0232
4	0,0352	0,0233
5	0,0354	0,0234

**Таблица 2. Аппроксимирующие функции и значения полученных параметров**

№	Название	Функция	Значения параметров
1 (N = 106)	степенная	$At = a \cdot d_{cp}^b$	$a = 5,461; b = 3,141;$ $S_q = 3,46 \cdot 10^{14}; \sigma^2 = 3,17 \cdot 10^{10}$ $R = 0,9978$
2 (N = 106)	две степенные	$At = a_1 d_{cp}^{b_1}$ если ( $d_{cp} \geq c$ ) $At = a_2 d_{cp}^{b_2}$ если ( $d_{cp} < c$ )	$a_1 = 5,397; b_1 = 3,143;$ $a_2 = 881; b_2 = 1,954;$ $c = 44,7; S_q = 3,40 \cdot 10^{14};$ $\sigma^2 = 3,21 \cdot 10^{10} R = 0,9979$
3 (N = 106)	две прямые в билогарифмических координатах	$Ln(At) = a_1 x + b_1$ если ( $x \geq c$ ) $Ln(At) = a_2 x + b_2$ если ( $x < c$ ), где $x = Ln(d_{cp})$	$a_1 = 2,676; b_1 = 3,993;$ $a_2 = 1,975; b_2 = 6,669;$ $c = 3,8; S_q = 3,986;$ $\sigma^2 = 3,76 \cdot 10^{-4}; R = 0,9963$
4 (N = 106)	кубический полином в билогарифмических координатах	$Ln(At) = a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4,$ где $x = Ln(d_{cp})$	$a_1 = 0,0393; a_2 = -0,232;$ $a_3 = 2,300; a_4 = 6,70,$ $S_q = 3,670; \sigma^2 = 3,43 \cdot 10^{-4};$ $R = 0,9966$
4 <sub>r</sub> (N = 90)			$a_1 = 0,0677; a_2 = 0,546;$ $a_3 = 3,189; a_4 = 5,131,$ $S_q = 12,844; \sigma^2 = 1,68 \cdot 10^{-3};$ $R = 0,9870$
5 (N = 106)			$a_1 = 0,00167; a_2 = -0,0104;$ $a_3 = 0,637; a_4 = 5,591,$ $S_q = 2,396; \sigma^2 = 2,24 \cdot 10^{-4};$ $R = 0,9978$
5 <sub>r</sub> (N = 90)			$a_1 = 0,0059; a_2 = -0,1494;$ $a_3 = 2,0515; a_4 = 0,4016;$ $S_q = 8,3996; \sigma^2 = 1,10 \cdot 10^{-3};$ $R = 0,9915$

**Примечание.**  $S_q$  - суммарное квадратичное отклонение,  $\sigma^2$  - средняя дисперсия,  $R$  – коэффициент детерминации,  $N$  – число точек. Индекс  $r$  возле номера функции соответствует данным сканирования в режиме на отражение, без индекса – пропускания.

суммарной оптической плотности (функция № 5). Эта функция дает минимальные значения суммарного квадратичного отклонения и дисперсии. Видно также, что режим сканирования на отражение существенно уступает сканированию на пропускание.

Используя найденные коэффициенты аппроксимирующих функций и величины диаметров или интегральных оптических плотностей пятен, согласно каждой из функций были

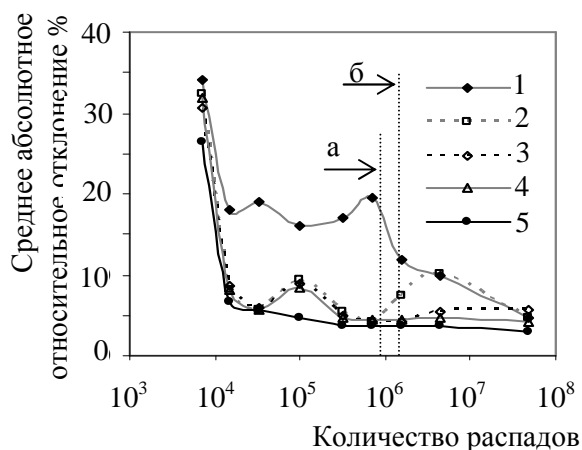


Рис. 5. Зависимость средних абсолютных относительных отклонений числа измеренных и вычисленных распадов от диапазона числа распадов для различных аппроксимирующих функций.

Числа возле кривых соответствуют номеру функции из табл. 2, вертикальные линии - точкам излома функций № 2 (а, б) и № 3 (б).

вычислены соответствующие количества распадов. Зависимости средних абсолютных относительных отклонений от числа распадов представлены на рис. 5. Сопоставление вычисленных и измеренных значений для каждой из частиц также свидетельствует в пользу использования функции № 5. В качестве примера в табл. 3 проведено сравнение измеренных и вычисленных значений для частицы с активностью 30 Бк.

Таблица 3. Сравнение значений активности, вычисленных согласно функциям 1 - 5 (см. табл. 2) для частицы с активностью 30 Бк (13 зарегистрированных пятен)

Номер функции	Средняя вычисленная активность, Бк	Доверительный интервал для среднего ( $p = 0.95$ ), Бк		Стандартное отклонение, Бк
		-95 %	+95 %	
1	13,14	6,13	20,15	11,60
2	27,58	23,64	31,52	6,52
3	29,27	27,53	31,00	2,87
4	29,10	27,25	30,94	3,06
5	29,85	28,60	31,10	2,07

### Проблема минимально-обнаружимых активностей

Использование широкого диапазона времен экспозиции для линейки частиц позволяет оценить минимально-обнаружимые активности «горячих» частиц в условиях эксперимента (тип фотопленки, режим проявления, методы регистрации и обработки). При этом следует разграничивать два разных случая:

1) минимально-обнаружимое число распадов – число распадов в течение времени экспозиции, приводящее к образованию минимального фиксируемого пятна в данном месте пленки (мы знаем, где должно находиться пятно, и пытаемся его обнаружить);

2) минимальное надежно фиксируемое число распадов - число распадов в течение времени экспозиции, приводящее к образованию надежно фиксируемого пятна (с заданной вероятностью отличающегося от флуктуаций фона).

Во втором случае, а именно он наиболее интересен, увеличение чувствительности (снижения порога обнаружения) зависит не только от основных свойств фотопленки, но и от уровня посторонних шумов - решающее значение приобретает чистота растворов, отсутствие пыли в помещении, где происходит высушивание пленки, бережное хранение и т.п.

В табл. 4 представлены минимальные активности, обнаруженные на трех фиксированных учетных уровнях. Здесь же указаны активности «горячих» частиц, пятна от которых

присутствуют на автордиограмме, но не регистрируются на данном учетном уровне. Видим, что на малых уровнях регистрации порог обнаружения резко снижается.

Ориентировочно в качестве минимального числа распадов, обнаруживаемых для точечного источника на данном уровне регистрации (125, 50, 25), можно принять 100000, 15000 и 6000 распадов соответственно, что соответствует минимальным регистрируемым уровням 0,08, 0,012 и 0,005 Бк при 2-недельной экспозиции.

Таблица 4. Зависимость минимально обнаруживаемой активности от уровня регистрации

Уровень регистрации	Активность, Бк	Время экспозиции, с	Число распадов	
			минимальное обнаруженное	максимальное не обнаруженное
125	30	4800	144000	72000
125	21,4	4800	102720	51360
125	8	19500	156000	76800
50	0,02*	777600	15552	8900
50	0,017*	777600	13220	6912
50	21,4	660	14124	6420
25	0,017*	345600	5875	2940
25	21,4	300	6420	"-"
25	8	660	5280	2400

\*Частички-сателлиты основных частиц линейки.

### Программная фильтрация ложных срабатываний

Любая автордиограмма, кроме полезной информации, содержит также и шум - царапины, пылинки, вуаль, маркировки и т.п., которые могут быть восприняты в качестве ложных радиографических пятен. Так, уже сам фотослой имеет некоторую, допустимую по техническим условиям, плотность дефектов, во время работы с фотослоем их число возрастает. Выделим характерные особенности, присущие автордиографическим пятнам: контур пятна на заданном уровне близок к окружности, пятно имеет диффузный край и достаточную суммарную интенсивность, а также достаточно большие размеры (порядка размеров минимально зарегистрированных пятен или больше). Рассмотрим распределение величин средней оптической плотности пятен ( $I_{cp}$ ) от их площади (S) в билогарифмических координатах (рис. 6). Как видим, рабочую область (скопление точек) ограничивают три зоны:

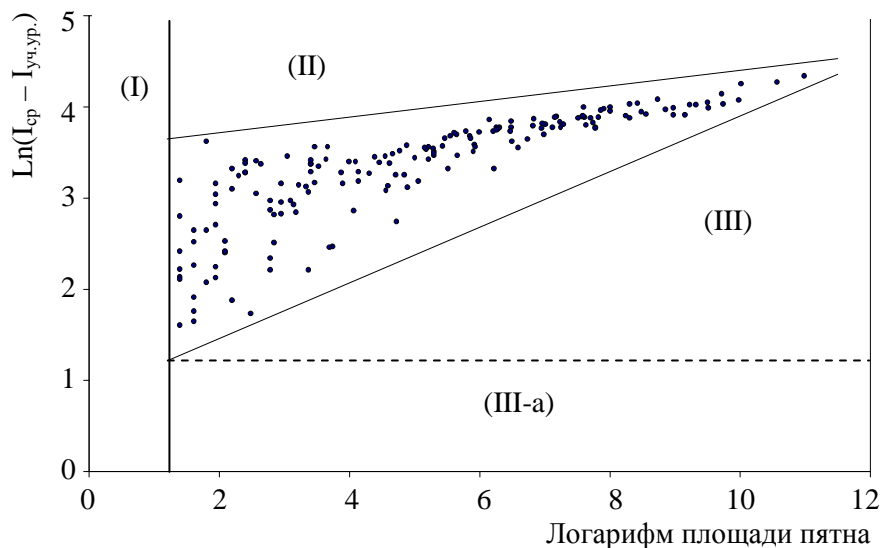


Рис. 6. Распределение экспериментально наблюдаемых пятен в координатах “логарифм превышения средней плотности над учетным уровнем – логарифм площади пятна”.



- I. Зона мелких нерегистрируемых пятен.
- II. Зона чрезмерно темных пятен со слабо выраженным диффузным краем.
- III. Зона пятен низкой интенсивности со слабо выраженной центральной частью.

Линии, отделяющие рабочую область от зон (II) и (III) соответствуют уравнениям:  
 $\ln(I_{cp} - I_{yч.ур.}) = 0.08 \cdot \ln(S) + 3.55$  и  $\ln(I_{cp} - I_{yч.ур.}) = 0.305 \cdot \ln(S) + 0,85$ .

Отбраковка зон (I) и (III-а) происходят на этапе обработки изображений в пакете ImagePro-5, для этого достаточно установить ограничения  $S \geq 4$  и  $I_{cp.} \geq 29$ . Дополнительным критерием отбора является соотношение радиусов пятна  $\frac{R_{max}}{R_{min}} \in [1 \div 2]$ , где  $R_{max}$  и  $R_{min}$  –

максимальный и минимальный радиусы пятна, соответствующие радиусам описанной и вписанной окружности. Отсев пятен в зоне (II) и оставшейся части зоны (III) можно провести с помощью пакета Excel. Пятна, попавшие в верхнюю часть зоны (III), просматриваем визуально с помощью пакета Image-Pro Plus 5.0, часть их, образовавшуюся за счет слияния мелких пятен, отдельно разлагаем на составляющие, другую часть, представляющую собой широкие диффузные пятна без выраженных центров – отбрасываем. (Понятно, что приведенные выше числовые значения зависят от условий получения автордиограммы и уровня регистрации.)

### Выводы

1. В области малых экспозиционных доз наблюдается отклонение зависимости “диаметр радиографического пятна «горячей» частицы - экспозиционная доза” от степенной функции, связанное с особенностями формирования радиографического пятна малых размеров.

2. Наличие такого отклонения не является достаточным основанием для предположений о дифференциации физических свойств «горячих» частиц в зависимости от их активности.

3. При выборе аппроксимирующей функции для логарифма числа распадов следует отдать предпочтение полиномам второй – третьей степени от логарифма интегральной оптической плотности пятна или, что несколько хуже, от логарифма его диаметра.

4. Для повышения точности определения малоактивных частиц предлагается дополнительно экспонировать линейку частиц на свободном участке фотопленки, выбирая время экспозиции порядка 5 - 10% от общего времени экспозиции фильтра.

5. Сканирование автордиограмм в режиме на пропускание и последующее определение параметров пятен с помощью программ обработки изображений позволяют автоматизировать процесс измерений и повысить точность определения параметров пятен.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатов С.А., Боровой А.А., Дубасов Ю.В., Ломоносов В.В. Форма и характеристики частиц топливного выброса при аварии на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. - 1990. - Т. 69, вып. 1. - С. 36 - 40.
2. Лавренчик В.Н. Глобальное выпадение продуктов ядерных взрывов. - М.: Атомиздат, 1965. - 170 с.
3. Быховский А.В., Зараев О.М. Горячие аэрозольные частицы при техническом использовании атомной энергии. - М.: Атомиздат, 1974. – 119 с.
4. Yoschenko V.I., Kashparov V.A., Protsak V.P., Tschiersch J. Autoradiographical methods for the assessment of radionuclides in hot particles on filter samples // Applied Radiation and Isotopes. - 2003. - Vol. 58, Iss. 1. - P. 95 - 102.
5. Демчук В.В., Мартынюк А.В. Создание калибровочных кривых для интерпретации радиографических измерений "горячих" частиц из выбросов объекта «Укрытие»: (Отчет о НИР по договору Р 1.2001). - К., 2001. – 13 с.

6. *Гаргер Е.К., Горковенко Б.Л., Шинкаренко В.К.* Об измерении  $\beta$ -активности большого количества "горячих" аэрозольных частиц с помощью автордиографии // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2005. - Вип. 2. - С. 33 - 40.
7. *Емельянов В.В.* К оценке чувствительности при определении низких уровней содержания радионуклидов в объектах окружающей среды // Радиохимия. – 1998. - Т. 40, вып. 2. - С. 177 - 182.
8. *Гаргер Е.К., Кашиур В.А., Ключников А.А. и др.* К оценке дозовых нагрузок за счет радиоактивного аэрозоля внутри и близ неплотностей объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2006. - Вип. 5. - С. 99 - 108.

Поступила в редакцию 28.01.08

## 15 ДО ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ «ГОРЯЧИХ» ЧАСТИНОК РАДІОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ

**В. К. Шинкаренко**

Розглянуто процедуру радіографічного визначення малоактивних «горячих» частинок, включаючи визначення параметрів радіографічних плям, побудову калібрувальних залежностей та фільтрацію хибних плям. Установлено, що відхилення залежності «активність «горячої» частинки - діаметр плями» від степеневі функції, яке спостерігається в області малих активностей, пов'язане з особливостями формування радіографічної плями малих розмірів і не є достатньою підставою для припущень про диференціацію складу речовини «горячих» частинок залежно від їхньої активності. При радіографічному визначенні активності «горячих» частинок рекомендовано використовувати в якості апроксимуючих функцій поліном другого, або третього степеня від логарифма інтегральної оптичної щільності плями.

## 15 TO DEFINITION OF ACTIVITY OF HOT PARTICLES BY A RADIOGRAPHIC METHOD

**V. K. Shynkarenko**

The procedure of radiographic definition of low-active hot particles, including definition of parameters of radiographic spots, build-up of calibrating dependences and filtration of false spots is discussed. It was determined that the deviation of a dependence of a hot particle activity from a power function, which is observed in the small activity interval, is concerned to features of small radiographic spot formation. This is not sufficient basis for the assumption about differentiating of substance composition of hot particles depending on their activity. For radiographic definition of hot particles activity it is recommended to use as approximating function in the form of quadratic or cubic polynomial of the logarithm of a spot integrated optical density.