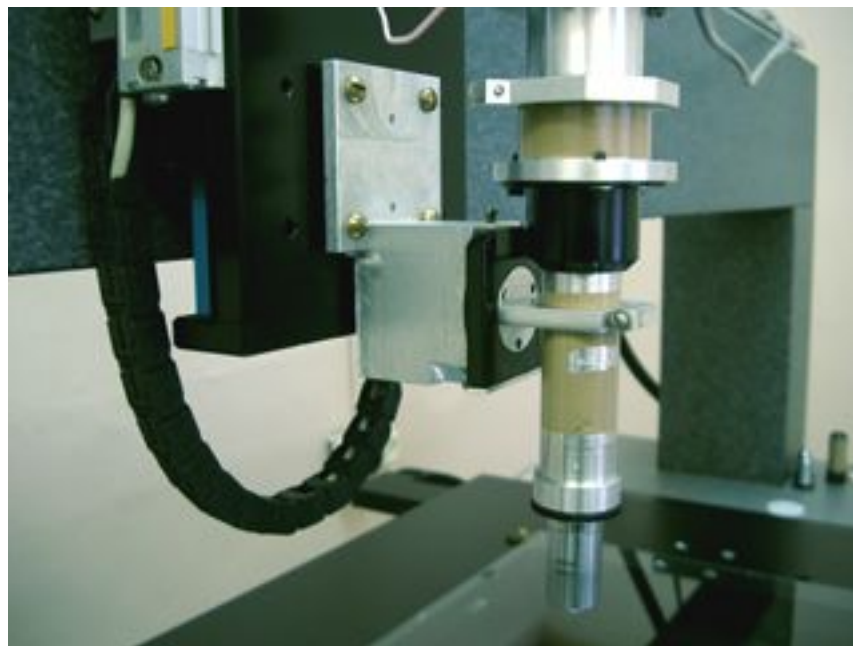


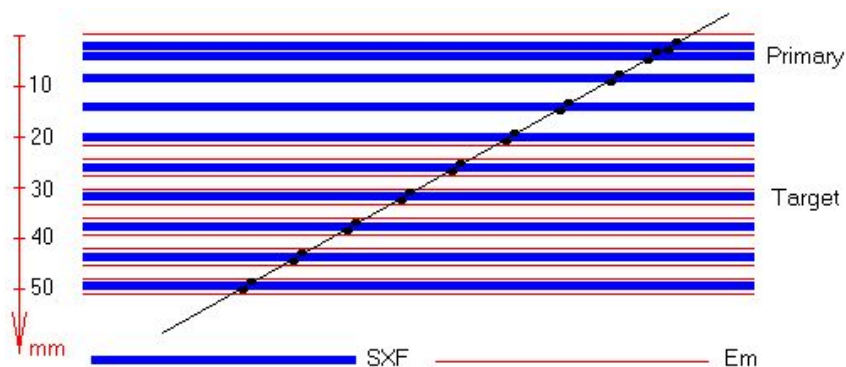
Метод автоматизированного анализа эмульсионных данных для измерения спектра ПКИ



Эксперимент RUNJOB

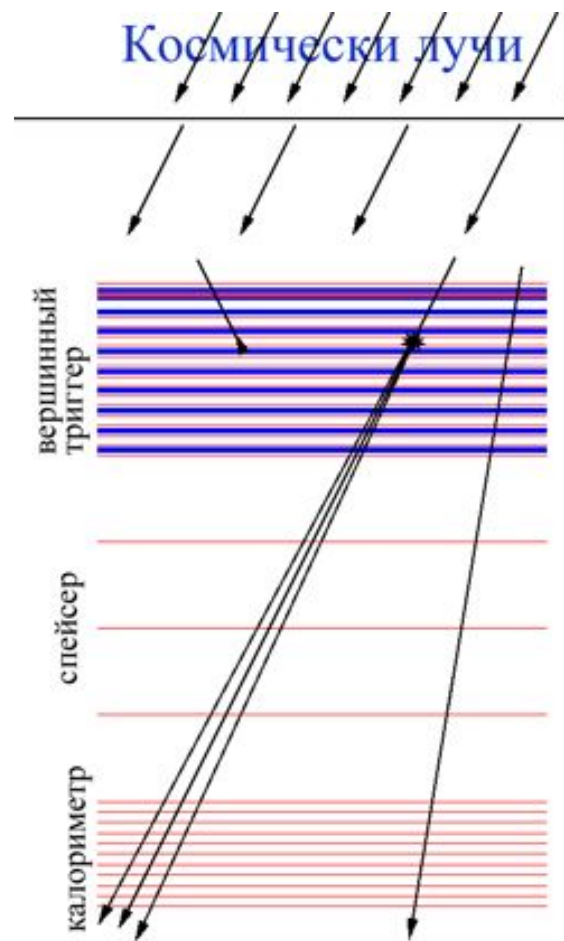
- Площадь камеры 50см×80см
- Высота полета ~32 км (10 г/см²)
- Время одного полета ~150 часов
- Суммарная экспозиция за 10 полетов 575 часов
- Диапазон измеряемых энергий 100 ГэВ÷100 ТэВ на частицу

Структура камеры



Расположение пленок SXF в камере RUNJOB

Первичный (Primary) и мишенный (Target) блоки содержат 10 рядов SXF.

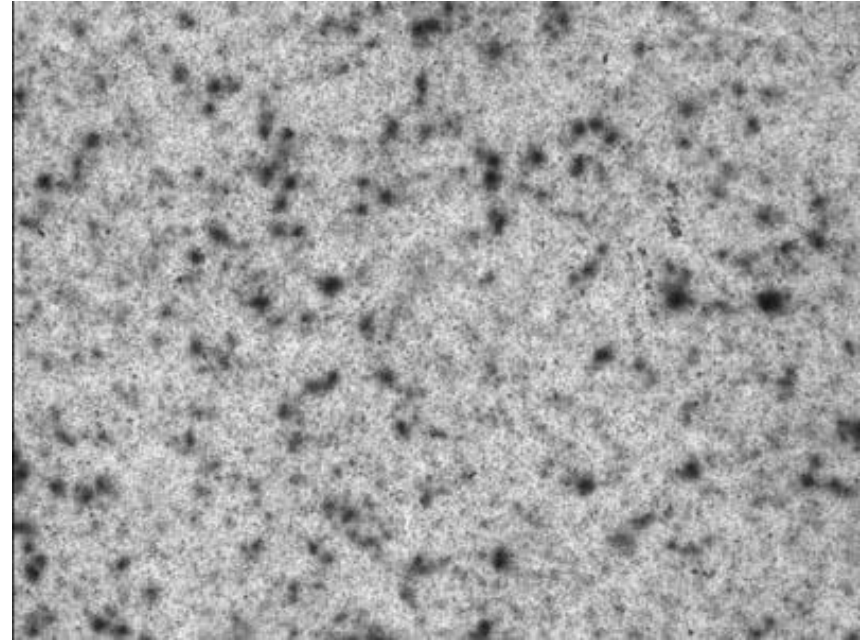
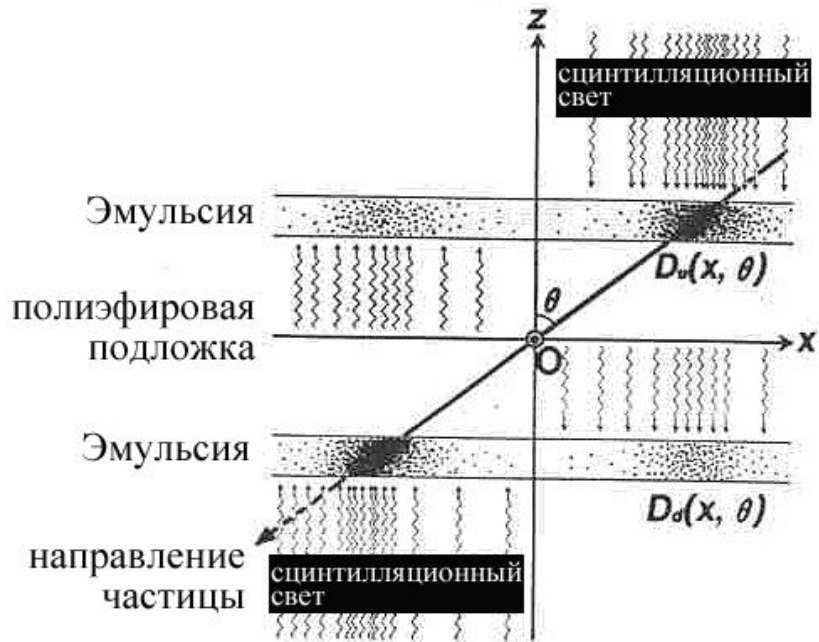


Взаимодействие ядра в камере

Алгоритм вершинного триггера

- поиск опорных треков, (найдено вручную 12 треков)
- «сшивка» камеры, восстановление общей системы координат, (специальная программа сшивки, точность сшивки – 40 мкм для 10 пленок площадью 40×50 см²).
- сканирование всех пленок
- поиск и определение координат пятен в пленках SXF
- восстановление траекторий по следам в пленках SXF
- предсказание координат вершин в эмульсии
- верификация вершин в полуавтоматическом режиме

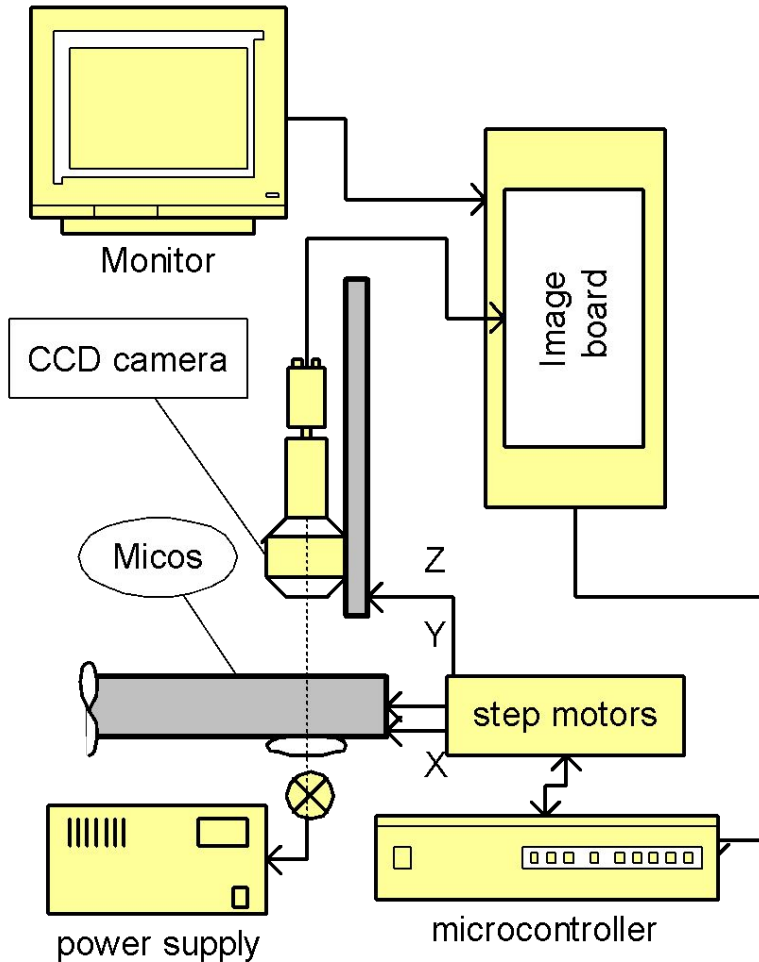
Пленка SXF



Структура рентгеновской пленки в поперечном сечении, без экранов-сцинтилляторов.

Изображение пленки в микроскопе, размер поля зрения $3.89 \times 2.96 \text{ мм}^2$

Измерительная система



- Механически стол MICOS
- Оптическая система
- Система ввода изображения
- Персональный компьютер
- Программное обеспечение

Параметры измерительной системы

- Прецизионный стол MICOS
 - диапазон перемещений по осям: 800мм × 400мм × 200мм
 - точность измерения координат: 0.5 мкм
 - габариты установки: 2.5×1.2×2.4 м³
 - вес: 1000 кг
- Система ввода изображения
 - пространственное разрешение матрицы: 1360×1024 пикселя
 - разрядность АЦП: 10 бит (1024 градации яркости)
 - кадровая частота: 7.5 Гц
 - время накопления экспозиции: 43 мс -114 сек
 - размер пикселя: 4.65×4.65 мкм²
- Микроскоп
 - Оптическое увеличение системы от 200 до 1000 крат (участок 400×300 мкм² выводится на экран 40×30 см), пространственное разрешение при максимальном увеличении - 1 пиксель = 1 мкм

Внешний вид установки



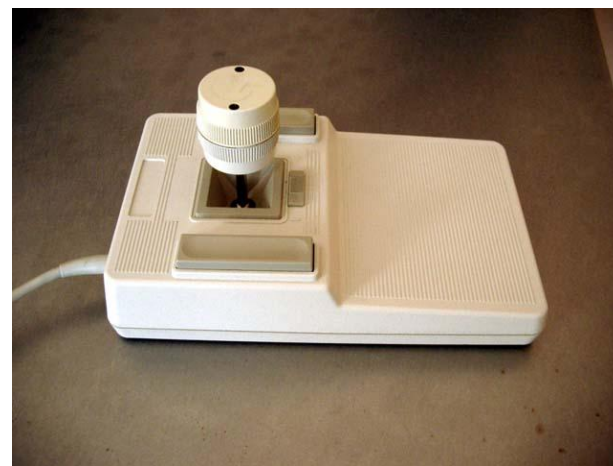
Чистая комната



Оптическая система

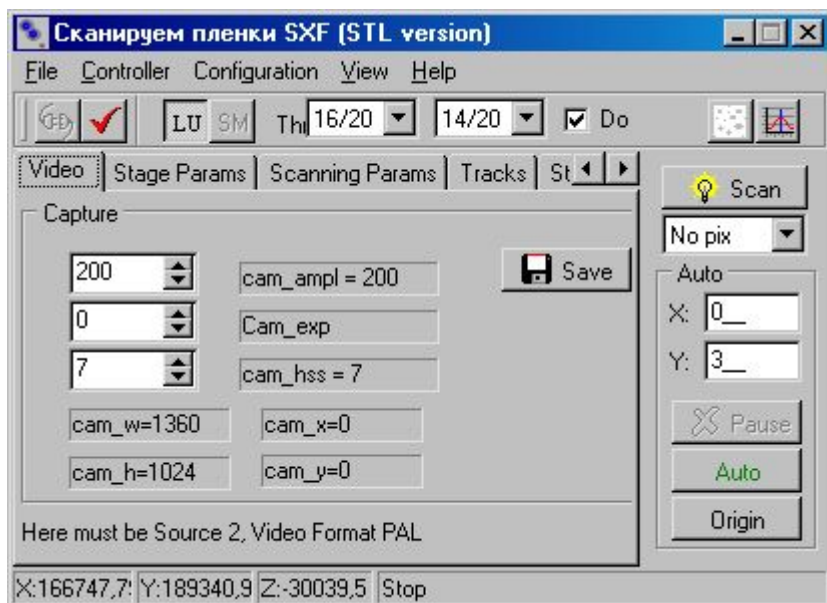


контроллер



джойстик

Программа сканирования

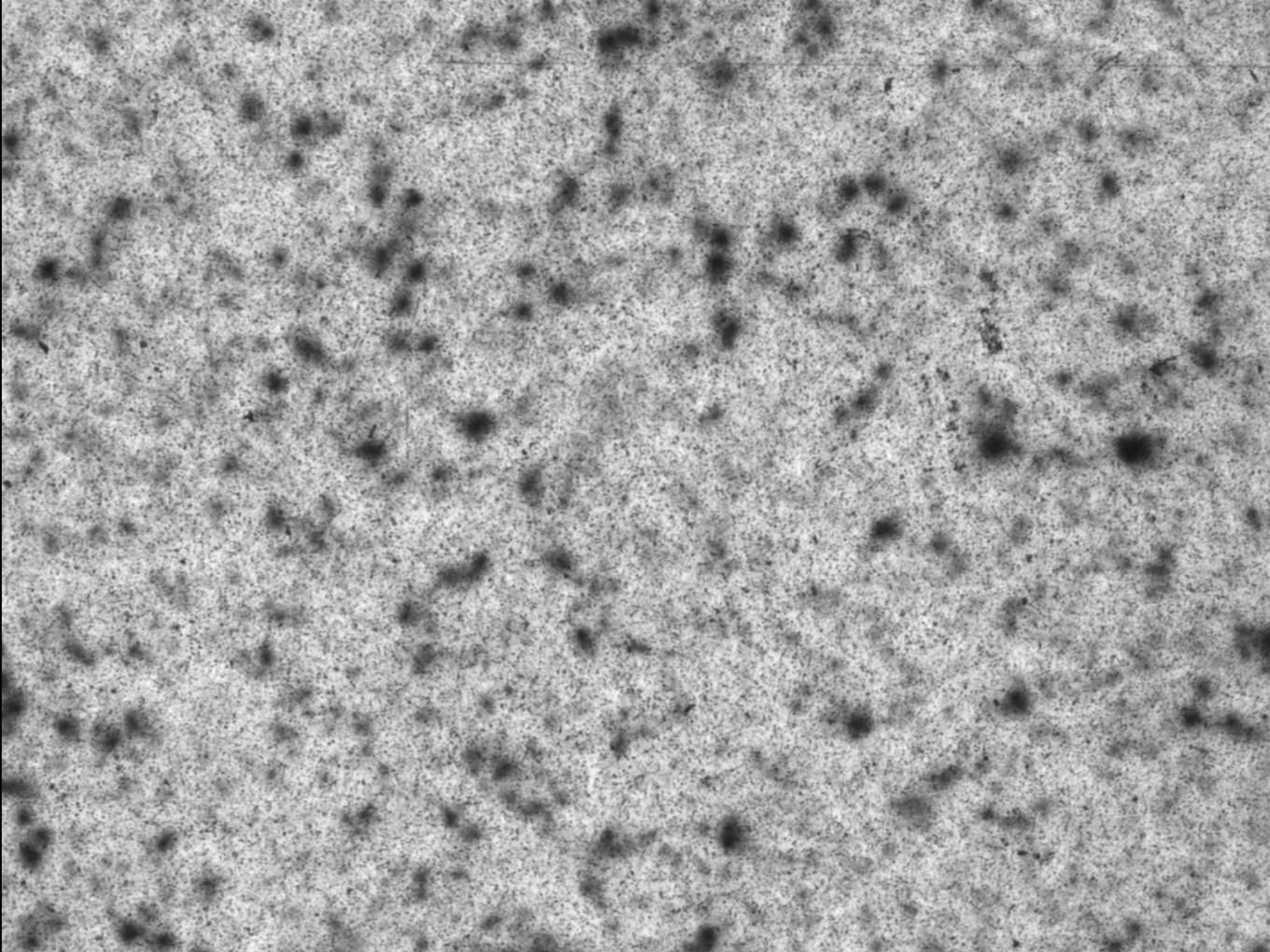


Интерфейс программы Scan.

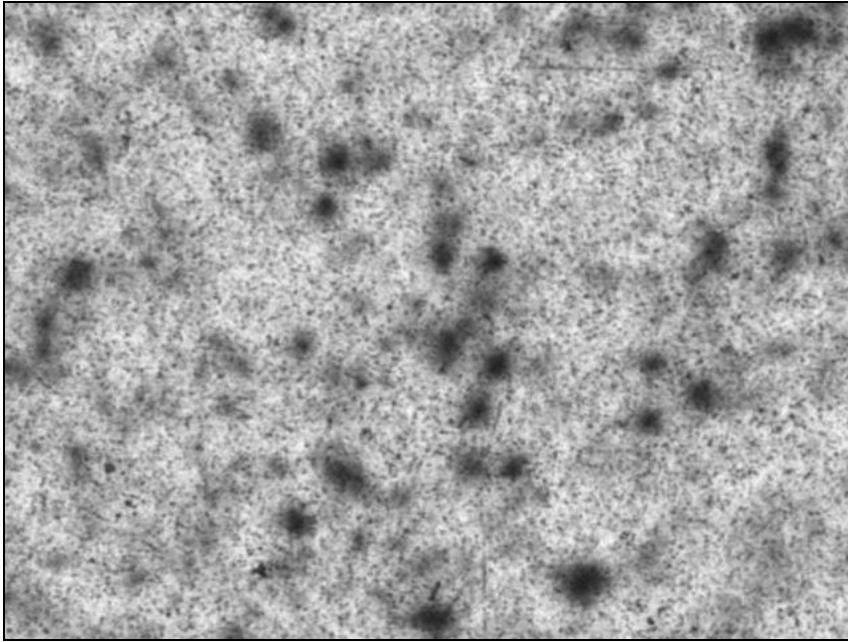
- Управление режимами работы Micos
- Перемещение стола в заданную точку по 3 осям координат (X, Y, Z), ± 0.001 мм
- Калибровка стола
- Вывод изображения на экран
- Запись изображения в файл в форматах BMP и JPG
- Управление режимами работы CCD-камеры
- Автоматическое выделение пятен

Параметры сканирования

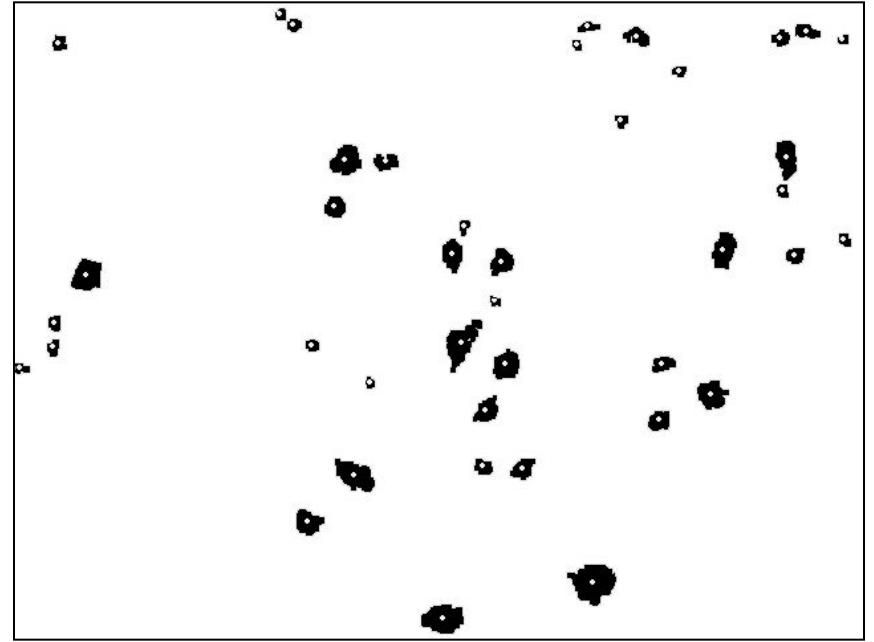
	Soling WAT-902A	Sony ICX205IL
Поле зрения, мм ²	3.89 × 2.96	10.130 × 7.620
Размер изображения, пикс ²	384 × 288	1360 × 1024
Шаг сканирования, мм	3.282 × 2.342=7.686	9.683 × 7.173=69.45
Полезное поле кадра, пикс ²	324 × 288	1300 × 964
Количество шагов сканирования	162 × 146 = 23652	49 × 52 = 2548
Время сканирования, часов	~ 8 часов	1 час 45 минут
Анализ изображения	on-line	Off-line
Отступ от края пленки, мм	10000	10000
Скорость, мкм/с	10000	10000
Ускорение, мкм/с ²	12800	12800



Выделение пятен

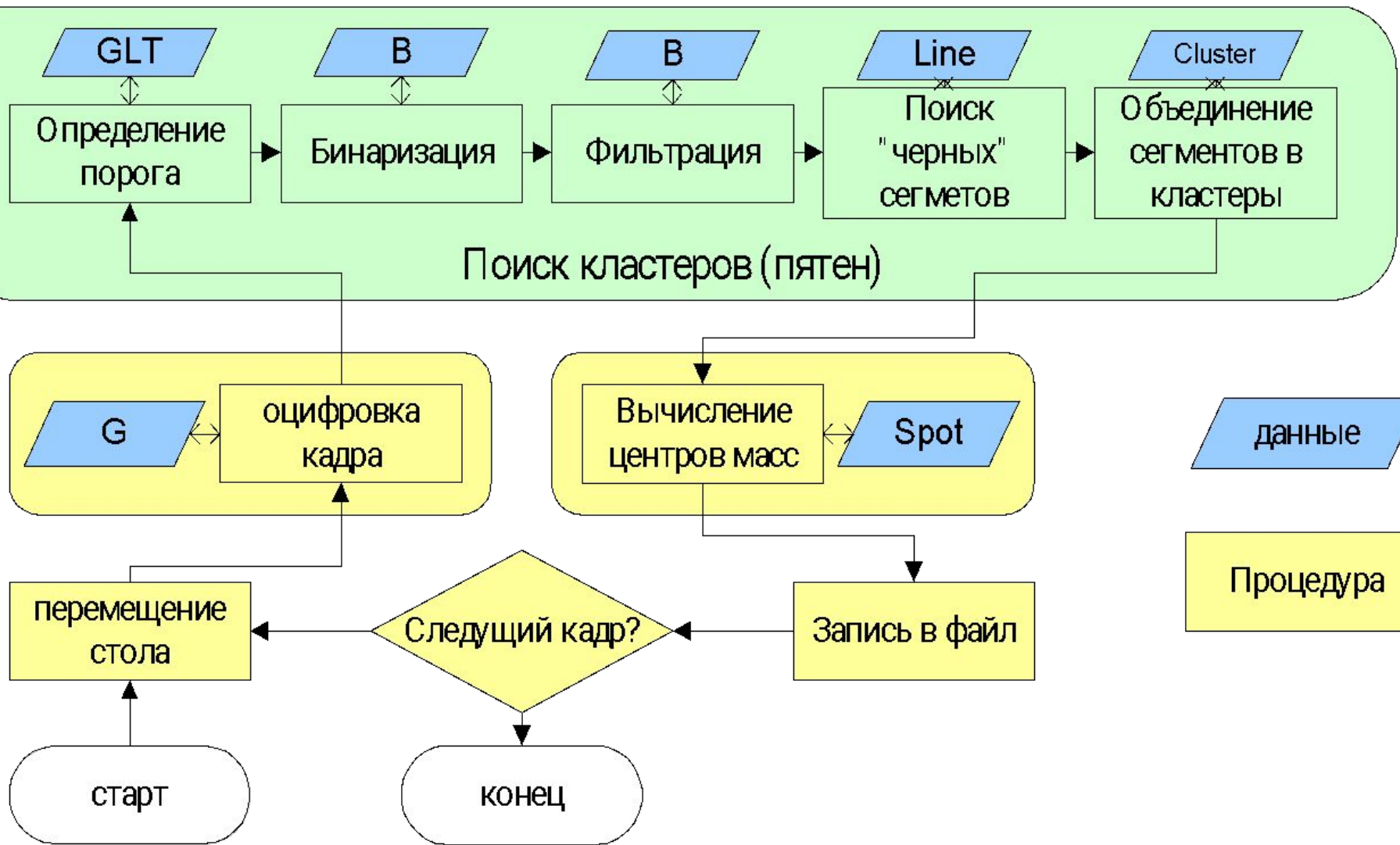


Исходное изображение,
640×480 пикселей



Результат выделения пятен.
Найдено 42 пятна и их центры

алгоритм



Блок схема работы алгоритма распознавания пятен.

Иллюстрация этапов обработки

1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0

Бинаризация – разделение пикселей на черные (0) и белые(1) по порогу

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0		
0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0		
0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0		
0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0		
0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0		
0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0		
0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0

После фильтрации – удалении тонких перешейков, длиной менее 2 пикселей.

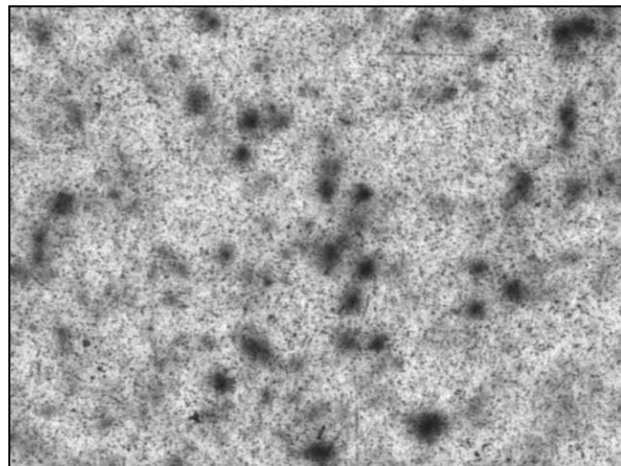
		2	2	2			4	4	4	4	4									
	2	2	2	2	2		4	4	4	4	4	4								
	2	2	2	2	2		4	4	4	4	4	4								
	2	2	2	2	2		4	4	4	4	4	4								
	2	2	2	2	2		4	4	4	4	4	4								
	2	2	2	2	2		4	4	4	4	4	4								
		2	2	2	2								7	7	7					
													7	7	7	7	7			

Кластеризация – объединение конгломератов пикселей в кластеры

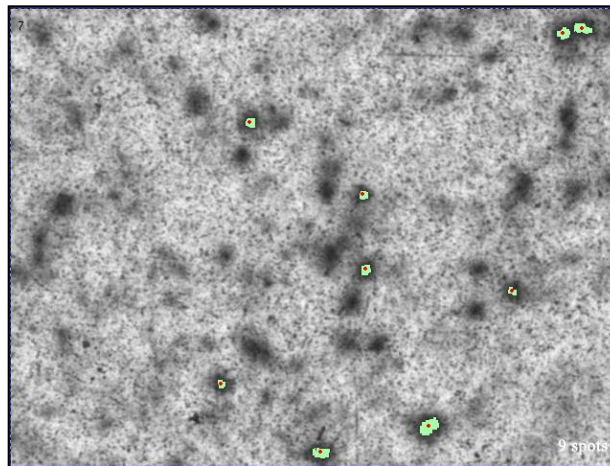
C[2][0]																				
C[2][1]																				
C[2][2]																				
C[2][3]																				
C[2][4]																				
C[2][5]																				
C[2][6]																				

Организация хранения кластеров в памяти

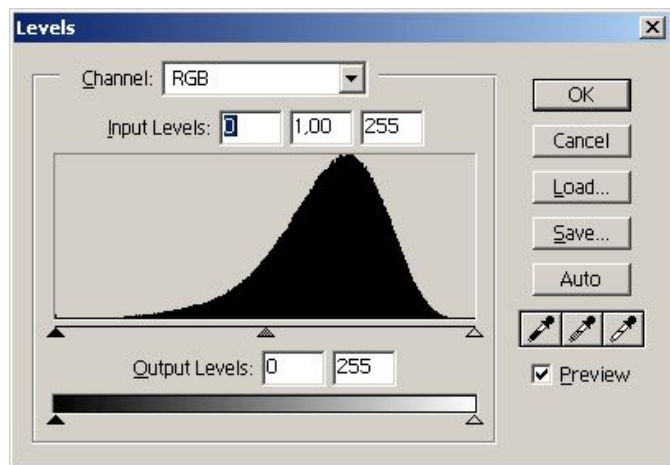
Результат при разных параметрах



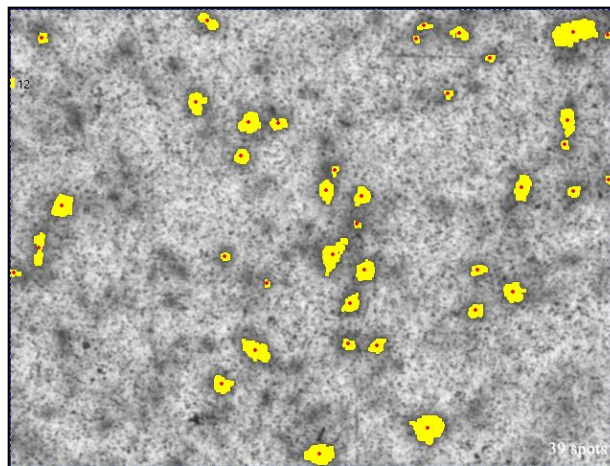
Исходный участок изображения



порог $K=7/20$.
Масштаб
изображения $5.065 \times 3.81 \text{ мм}^2$ (1/4
изображения).
Количество
найденных пятен –
9 штук.

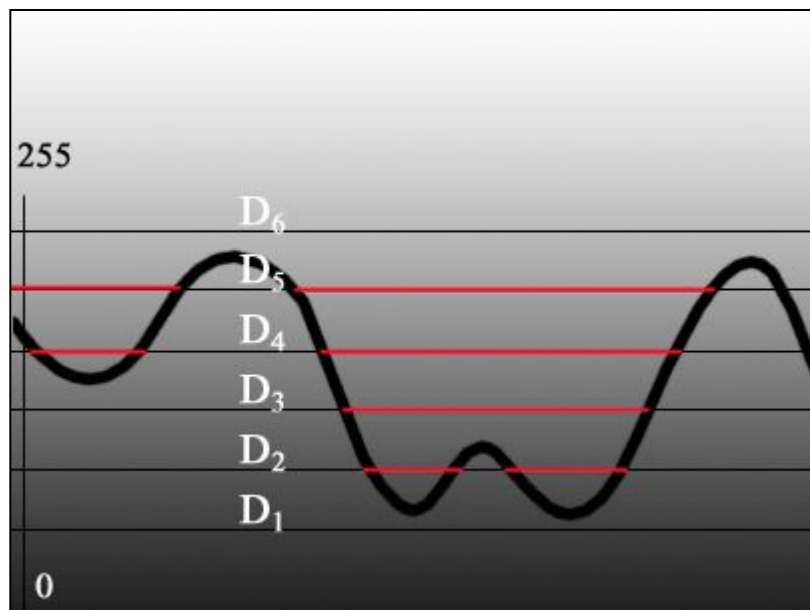


Гистограмма яркости пикселей кадра



порог $K=12/20$.
Масштаб
изображения
 $5.065 \times 3.81 \text{ мм}^2$
(1/4
изображения).
Количество
найденных пятен
– 39 штук

Плавающий порог

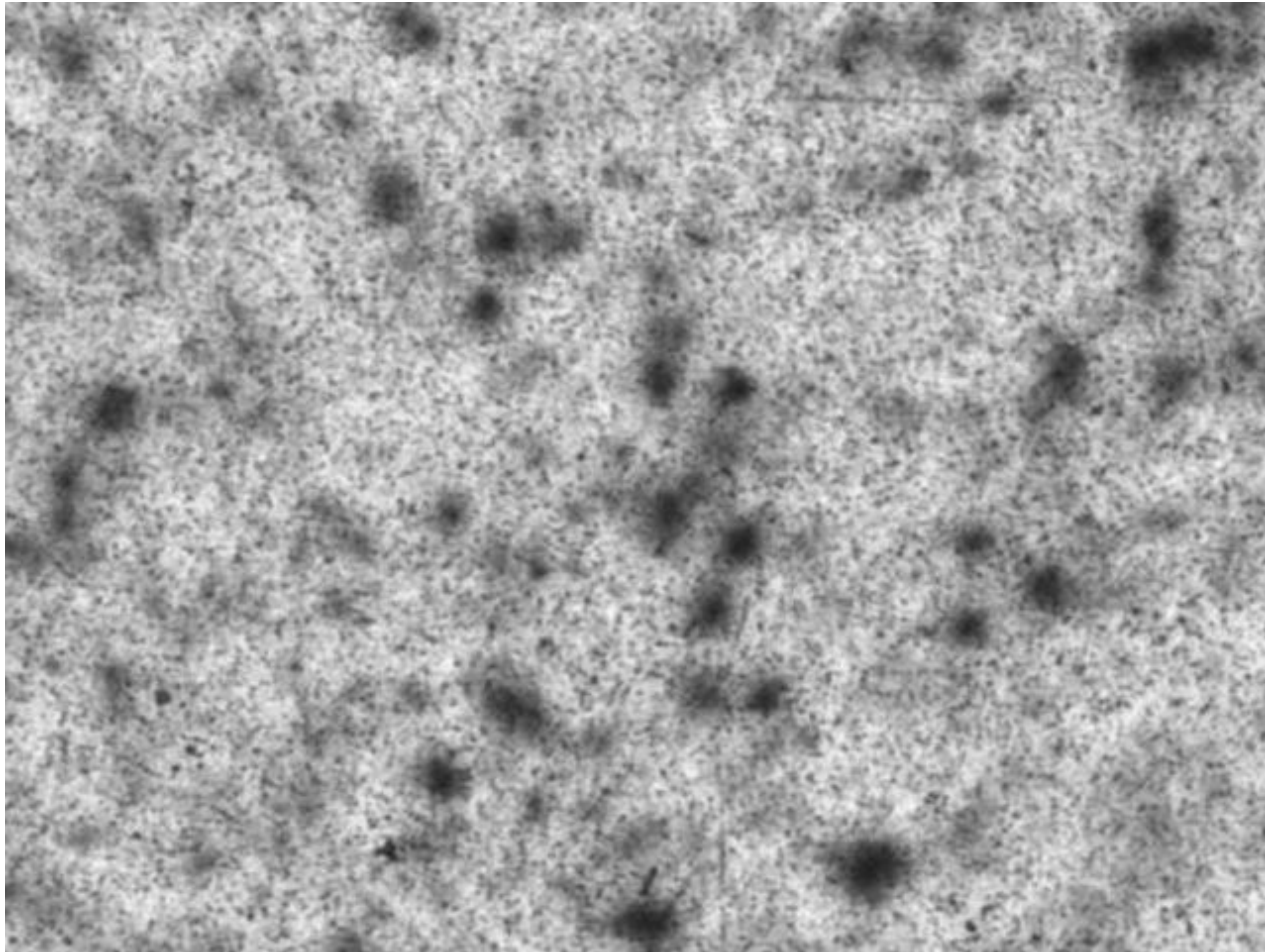


Выбор порога

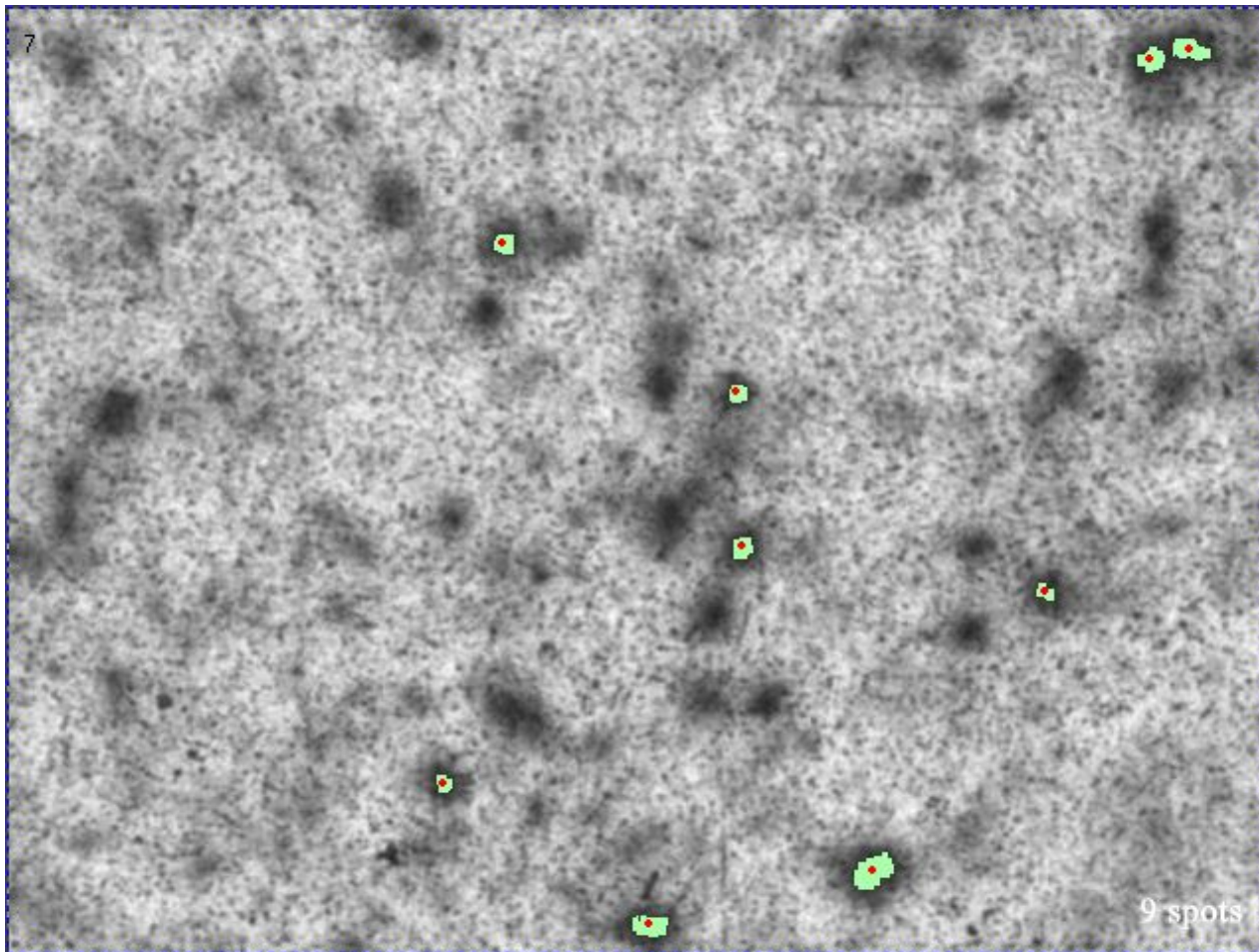
В данной работе используется набор из нескольких порогов (3-5), каждый из которых даёт свою картину кластеров. Результаты работы алгоритма с каждым из порогов потом сопоставляются между собой, так чтобы выявить истинные пятна

Теоретически, применяя неограниченный набор порогов бинаризации, т.е. делая множество срезов на «местности» рельефа яркости пикселей, можно выделить все пятна потемнения.

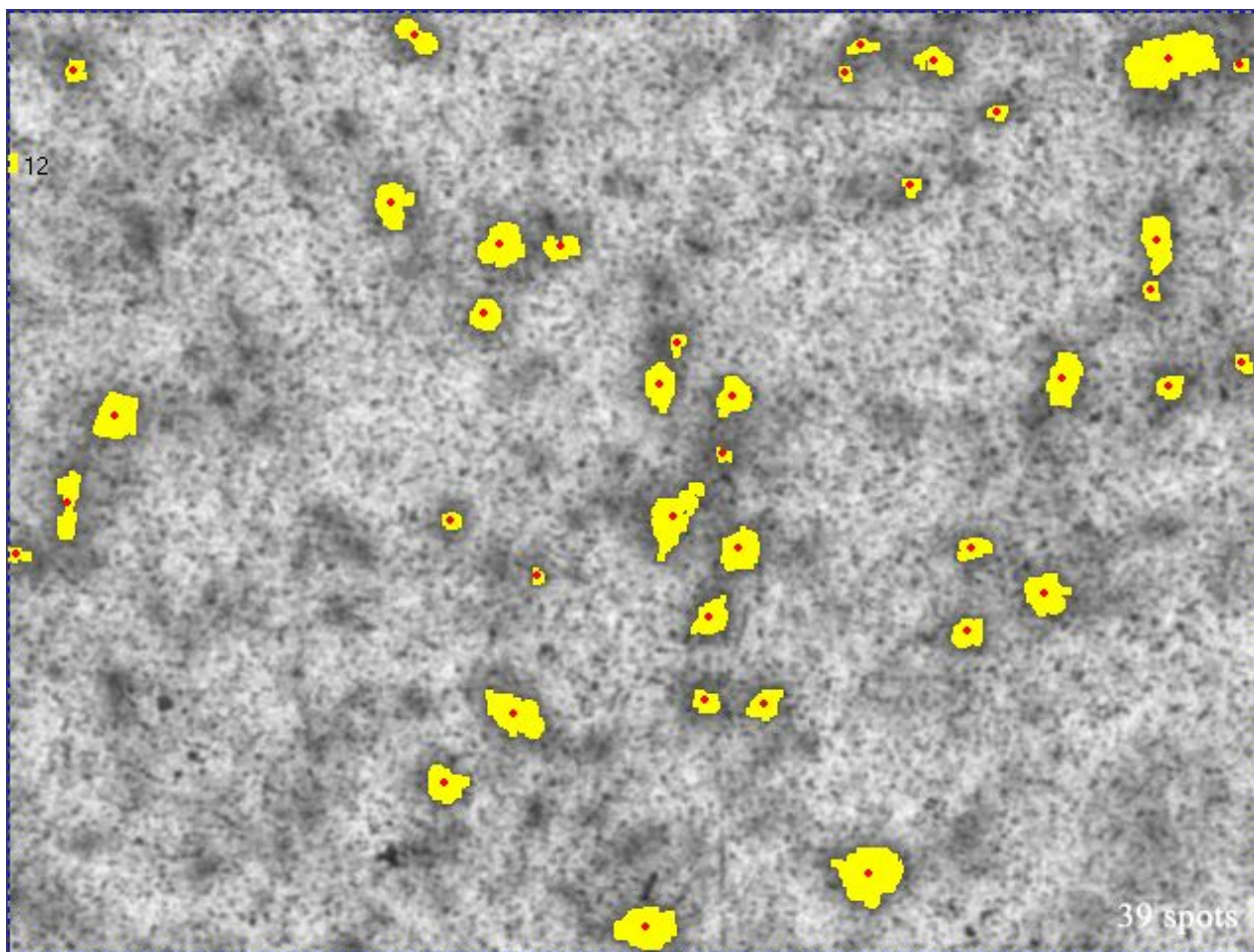
Исходный кадр



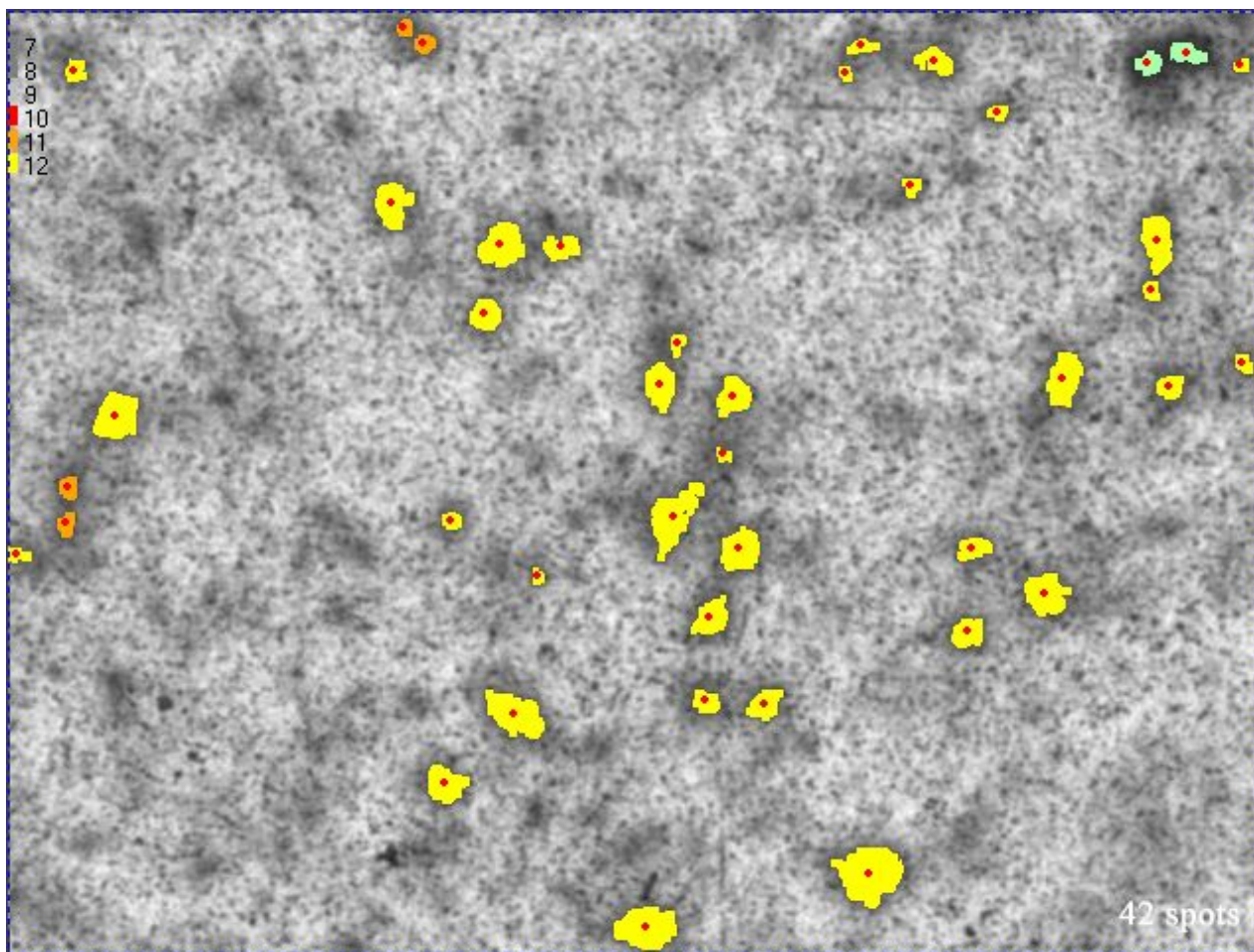
Результат работы алгоритма выделения пятен, порог $K=7/20$.
Масштаб изображения 5.065×3.81 мм² (1/4 изображения).
Количество найденных пятен – 9 штук.



Результат работы алгоритма выделения пятен, порог $K=12/20$.
Масштаб изображения 5.065×3.81 мм² (1/4 изображения).
Количество найденных пятен – 39 штук.



Результат работы алгоритма выделения пятен, плавающий порог $K=7/20-12/20$.
Масштаб изображения 5.065×3.81 мм² (1/4 изображения).
Количество найденных пятен – 42.

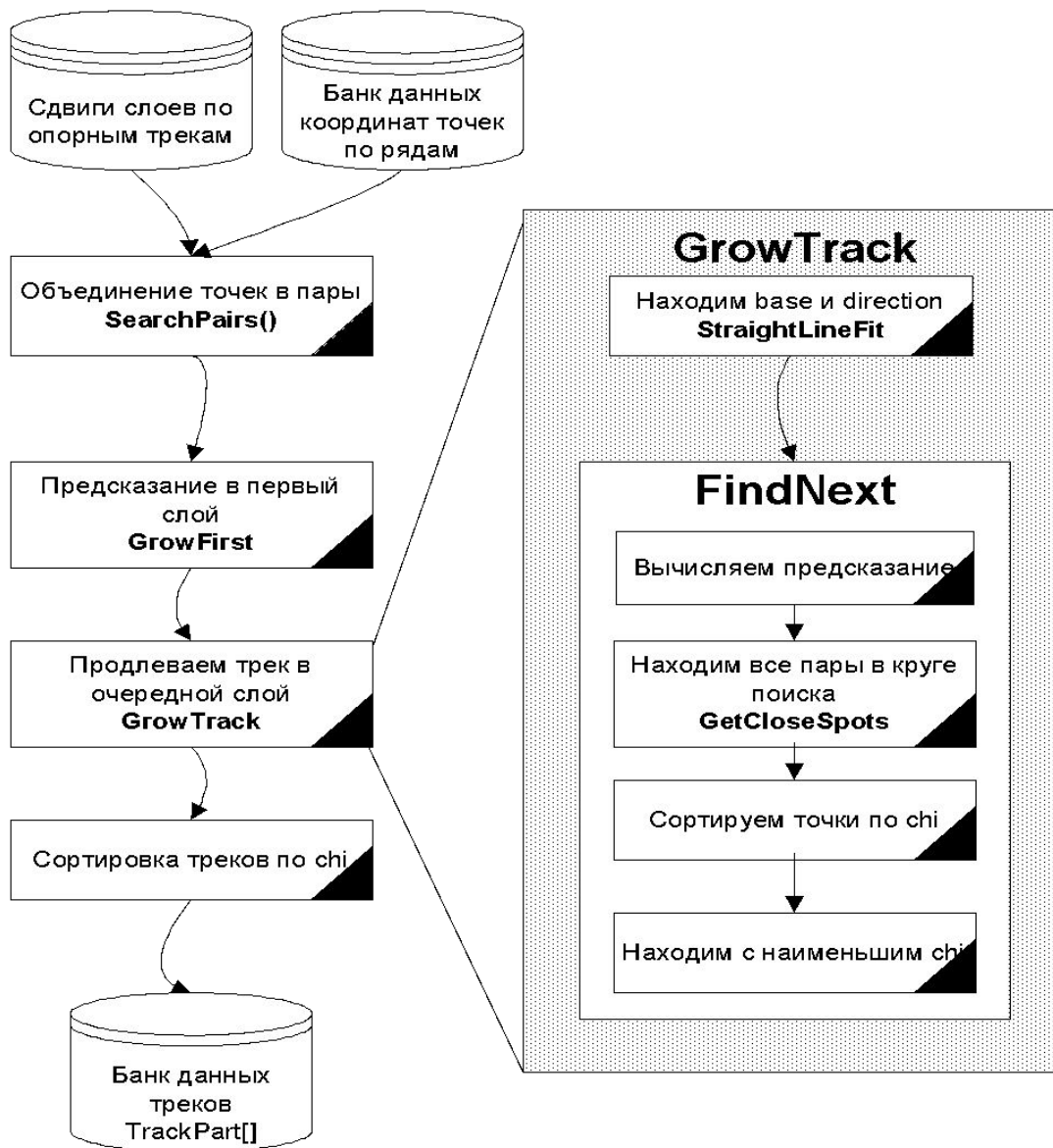


Исходные данные

	Всего пятен	После выборки< 2000
1	365743	365588 (-155)
2	361345	361178 (-167)
3	348555	348485 (-70)
4	371009	370928 (-81)
5	367828	367743 (-85)
6	364532	364429 (-103)
7	358111	358033 (-78)
8	369987	369861 (-126)
9	355997	355866 (-131)
10	341865	341755 (-110)
11		323605
12		214615

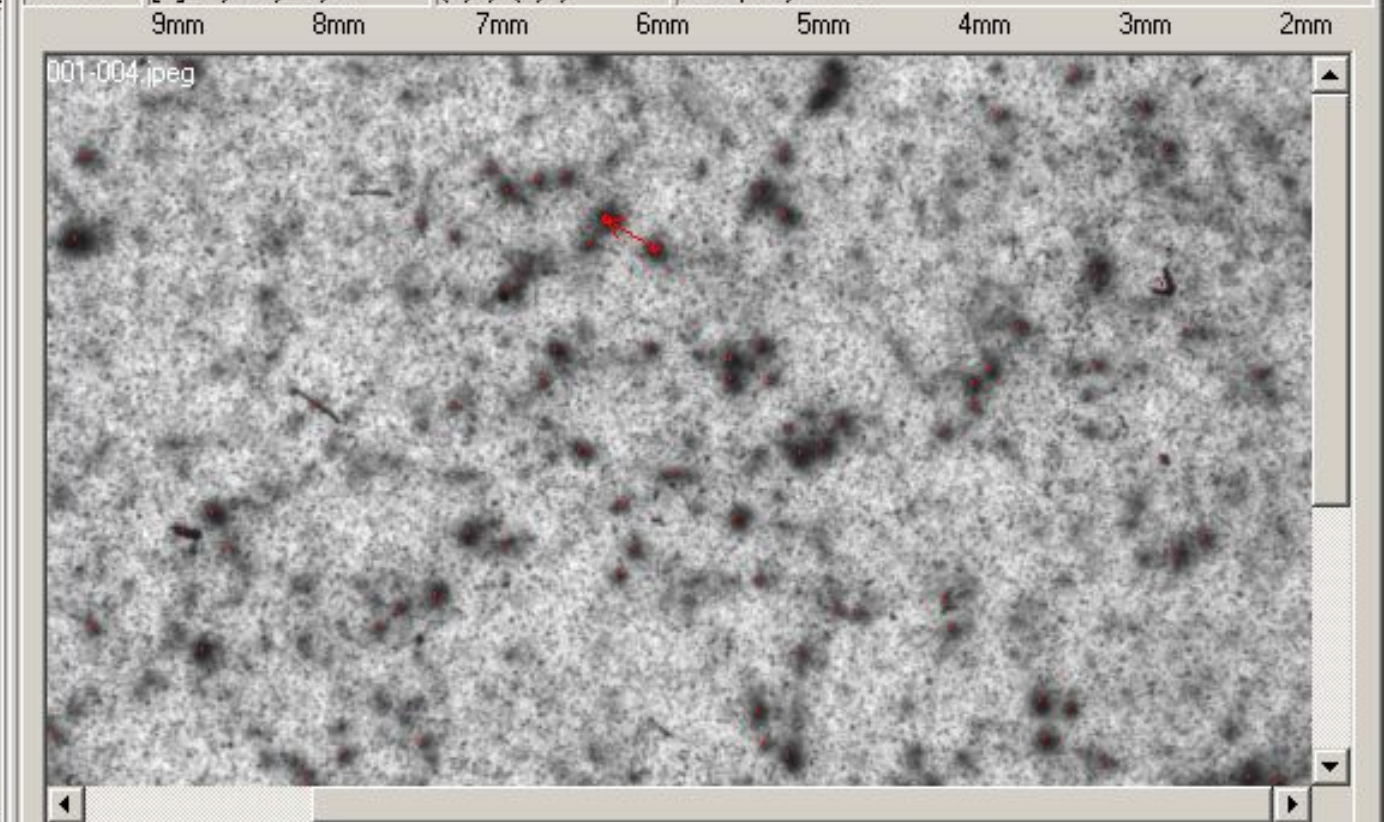
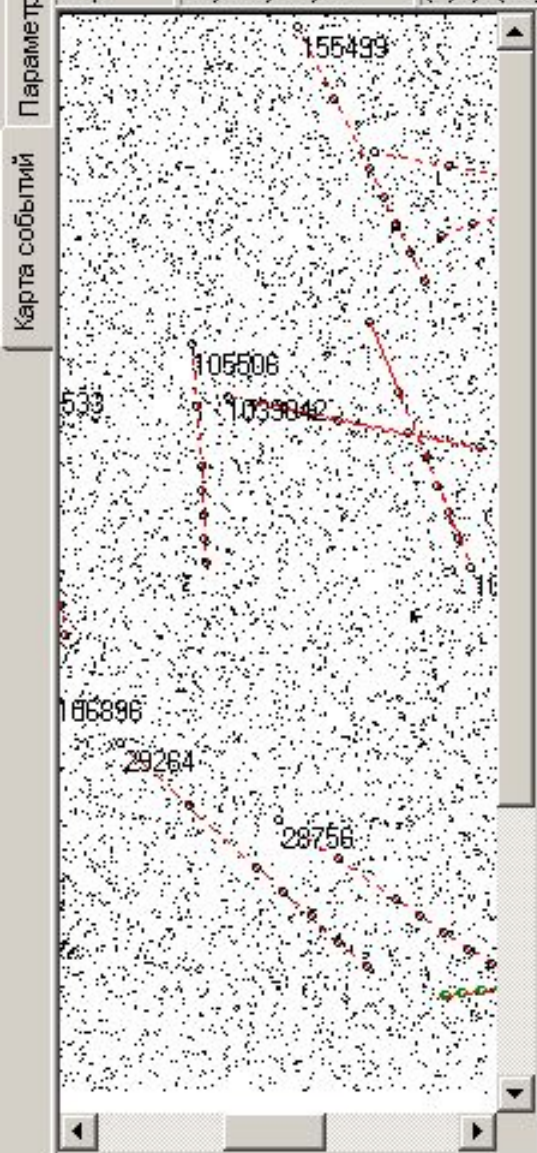
Всего кадров 49×52	2 548
Ширина кадра StepX, мм	9.683
Высота кадра, StepY, мм	7.174
Площадь кадра, мм S=9.683×7.173	69.46
Площадь сканированной пленки, мм ² $S_{\text{скан}}=2548 \times 0.6946$	1769.74
Площадь всей пленки 50×40 мм ²	2 000
Количество пятен на одной пленке	350 000

Блок схема программы трекинг.



Map 48,600, 49,400 (0,0)x(13)

Screen [3] 64,240, 19,957 (5,1)x(5,1) ChiSq: 0,021917
9mm 8mm 7mm 6mm 5mm 4mm 3mm 2mm

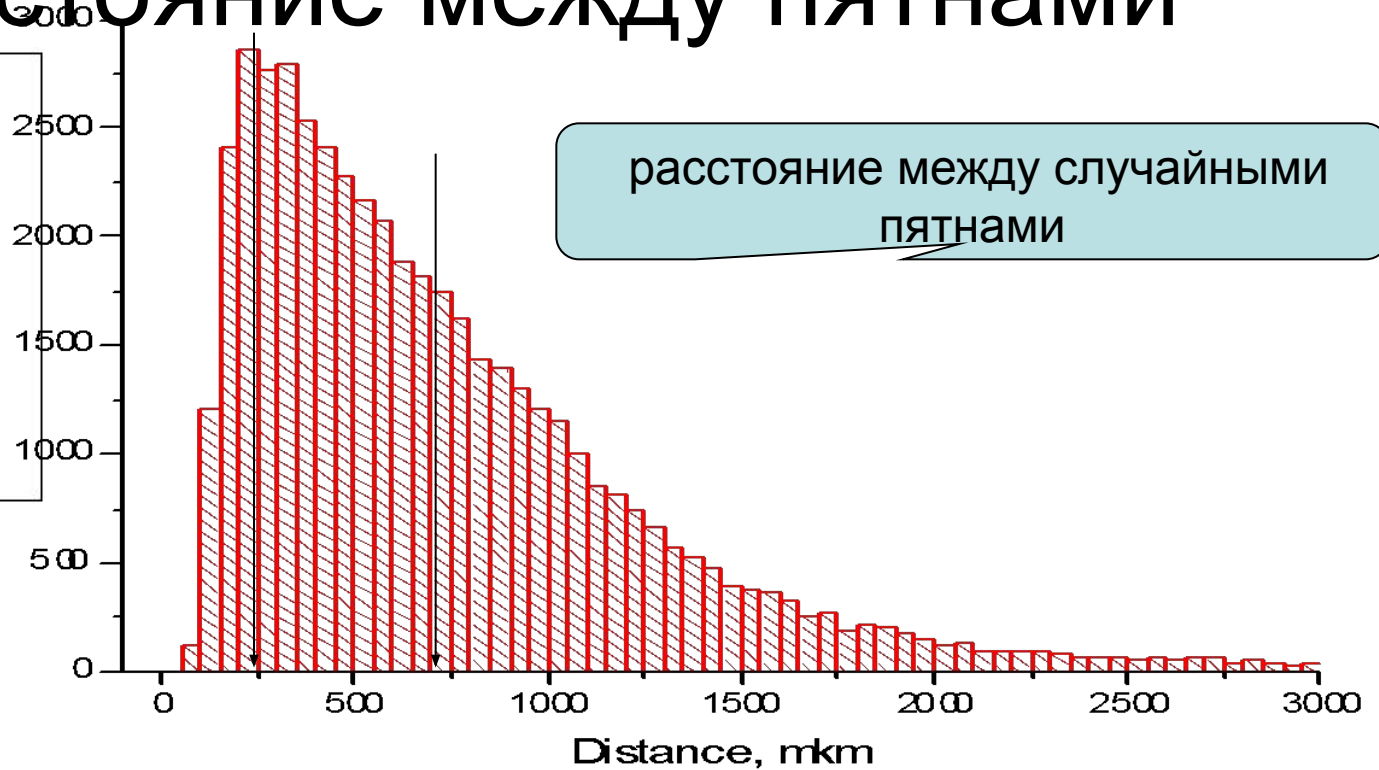
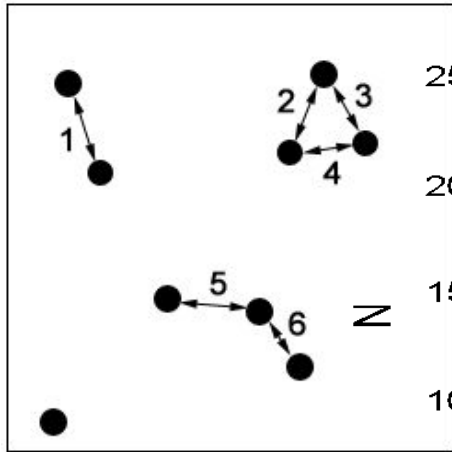


Область трекинга
X Y TL
0_ 0_
13_ 9_ BR
5_ Scale

Screen Size
1 0.5 1.0 2.0
12 45,221, 350,969 [1,015]
10 37,597, 345,195 [1,156]

Manual Tracking
==> 62,542,23,189 3
==> 62,840,23,383
Trace Up 1 2
front: 1 2 [3] 4 5 6 7 -->back

Расстояние между пятнами



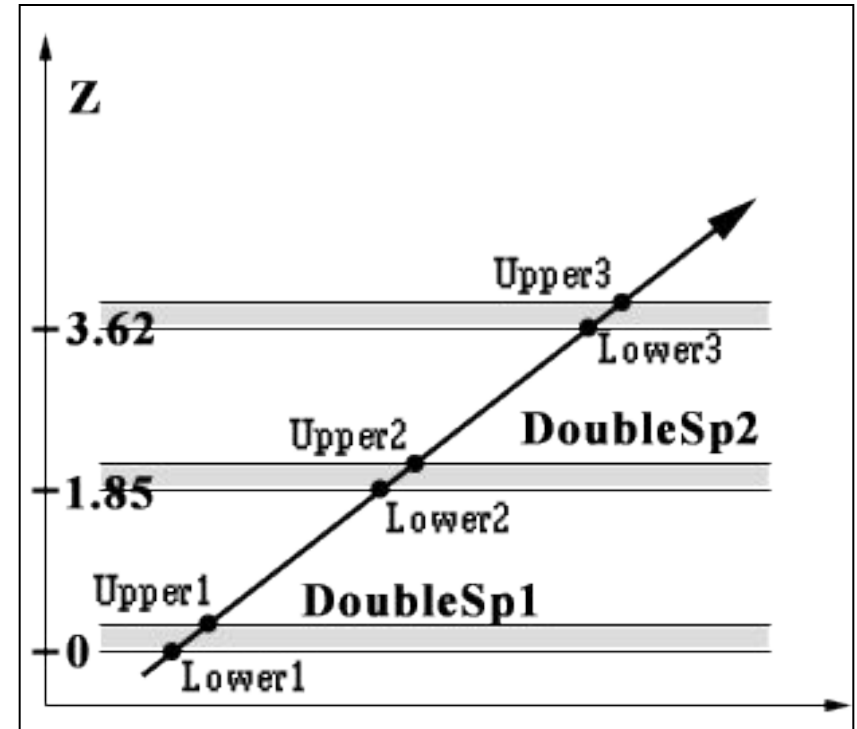
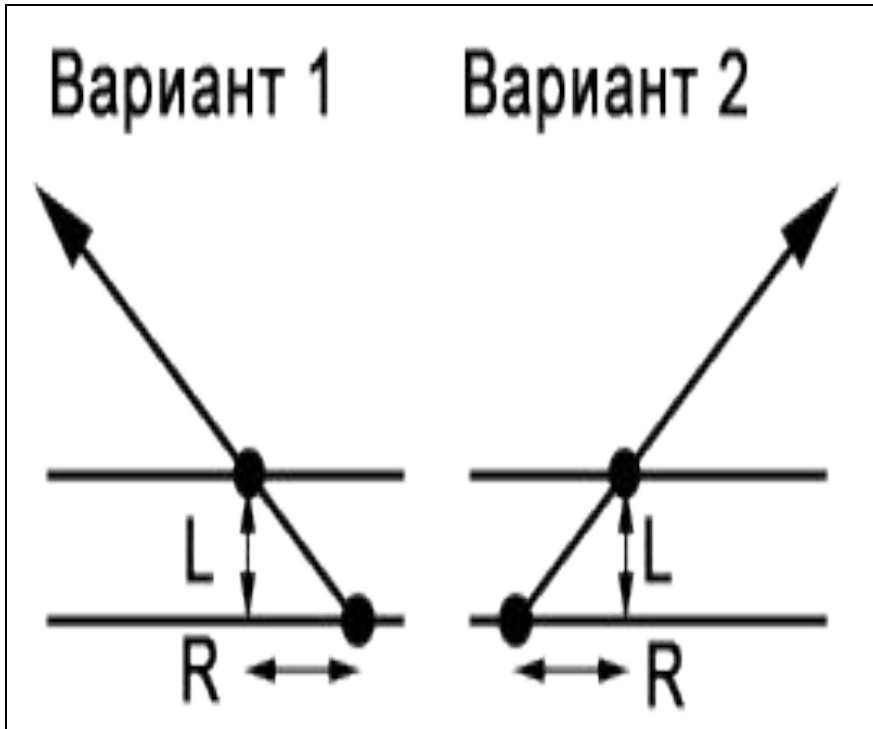
$$R_{rand} = \sqrt{\frac{S}{N}} = \sqrt{\frac{1 \tilde{n}^2}{200 \varphi^2}} = 0.71 \tilde{n} \quad - \text{среднее расстояние между пятнами при случайном распределении}$$

Вывод: 1) Максимум распределения 250 мкм

2) максимум меньше среднего значения -> пятна коррелированы

3) Ограничение на максимальный угол – $\tan(\theta) = 710/270=2.6$, - $\cos(\theta)_{\min}=0.36$

Предсказание в следующий слой



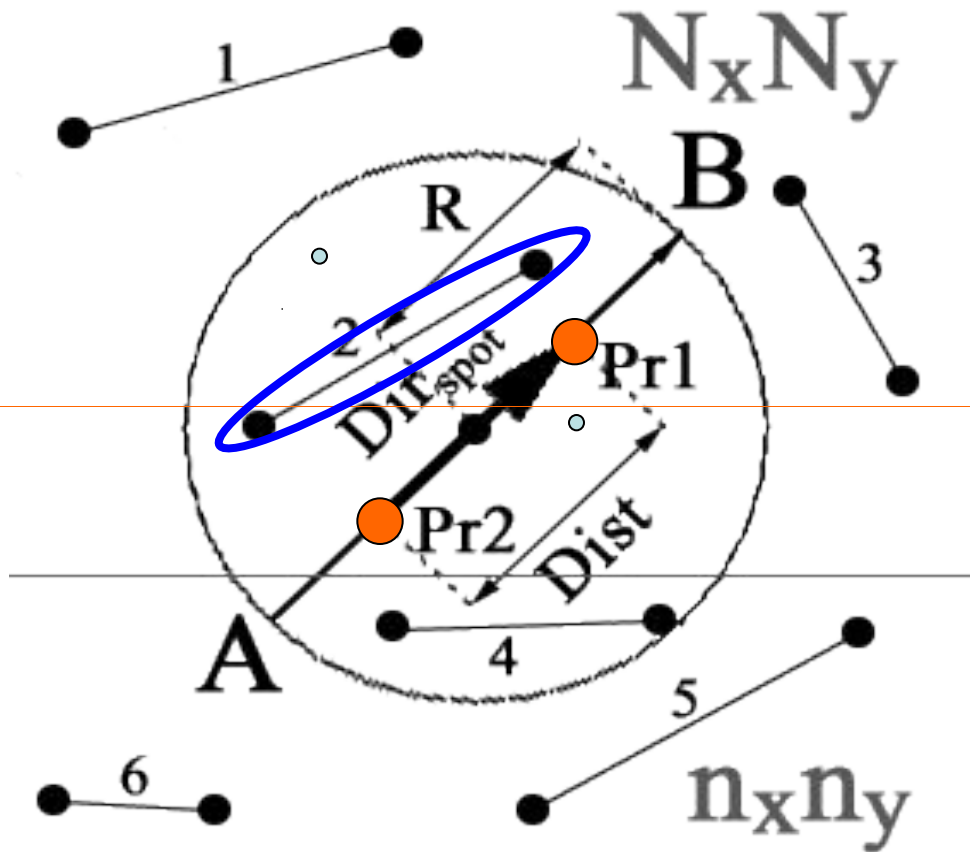
$$\overrightarrow{pos(x, y, z)} = \lambda \times \overrightarrow{dir}$$

- уравнение трека, где:

\overrightarrow{dir} - трехмерный единичный вектор направления

\overrightarrow{base} - вектор в плоскости XYO , λ – скалярная величина

Выбор двойного пятна



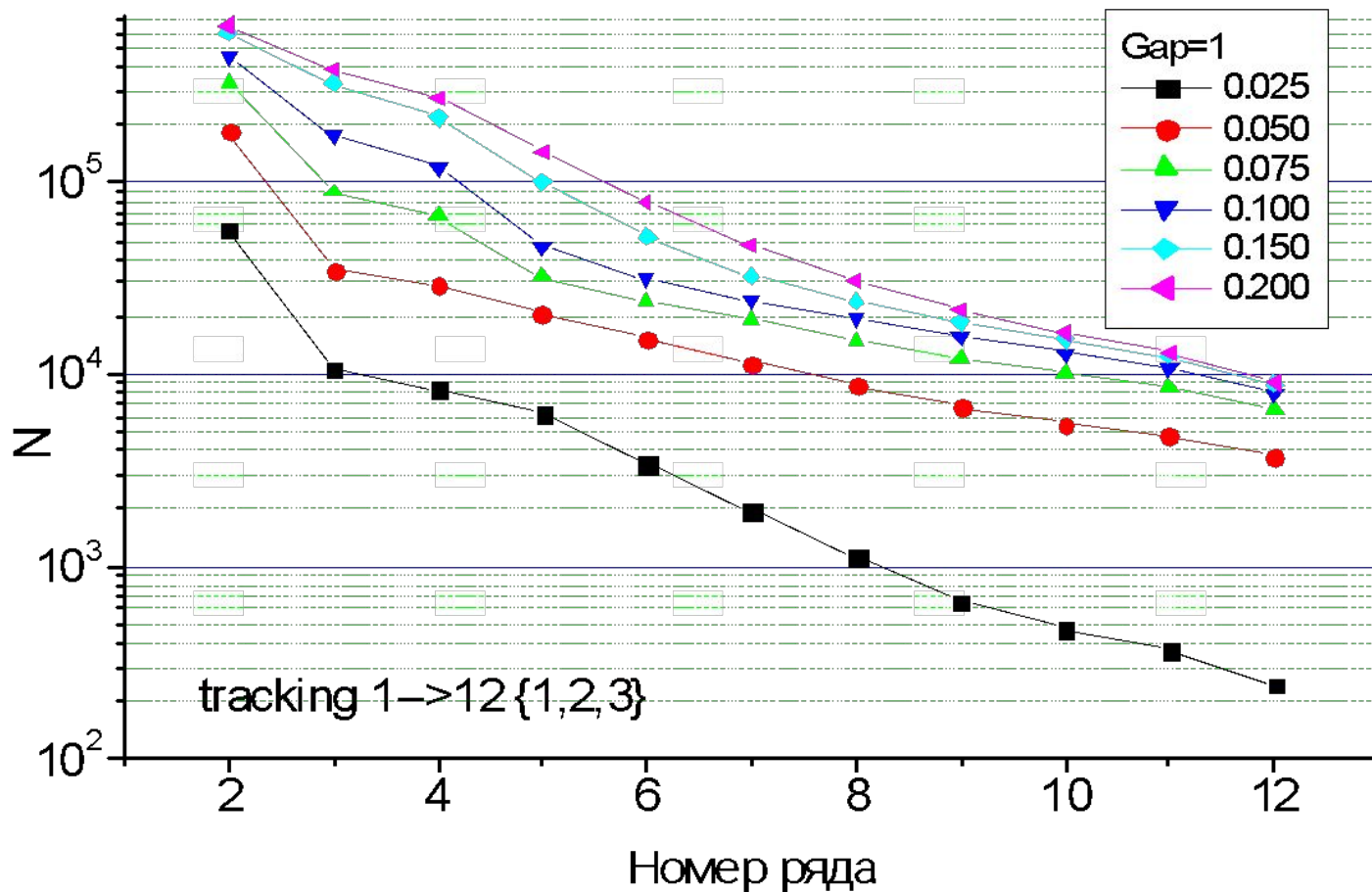
Двойное пятно -
лучший кандидат

Предсказание в
следующий слой

$$\frac{|\overrightarrow{(DirSpot)}| - Dist}{Dist} < (\Delta r/r)_{\max}$$

$$\Delta\varphi < (\Delta\varphi)_{\max}$$

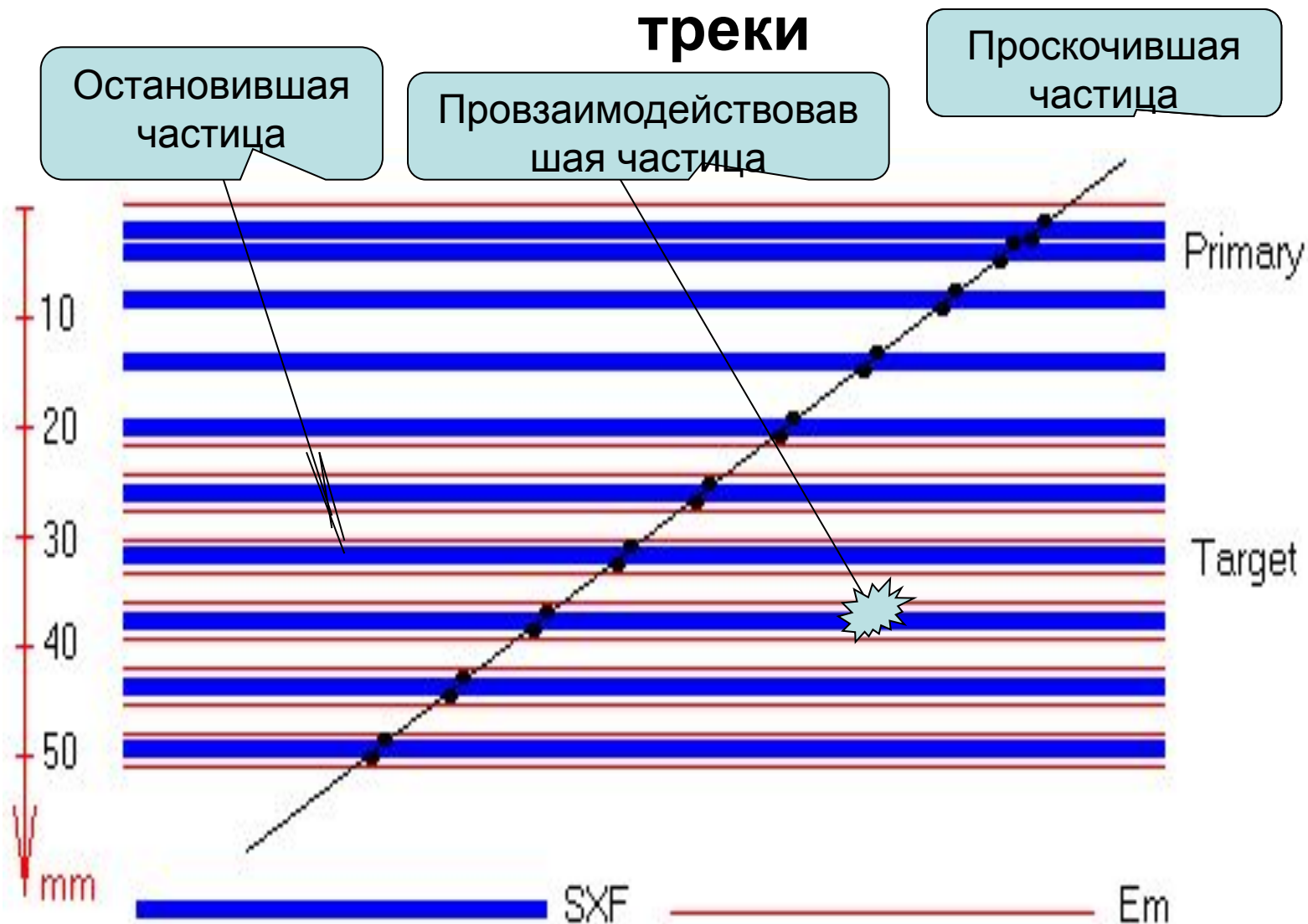
Количество треков



Ряд	0.05	0.1
2	183783	445709
3	35166	175600
4	29230	121099
5	20801	46422
6	15295	31118
7	11520	24359
8	8738	19551
9	6766	15780
10	5576	13004
11	4738	10836
12	3702	8028

Количество треков, прослеженных до определенного ряда. Разными значками обозначены треки с разными значениями χ в мм. Gap=1, start={1,2,3}

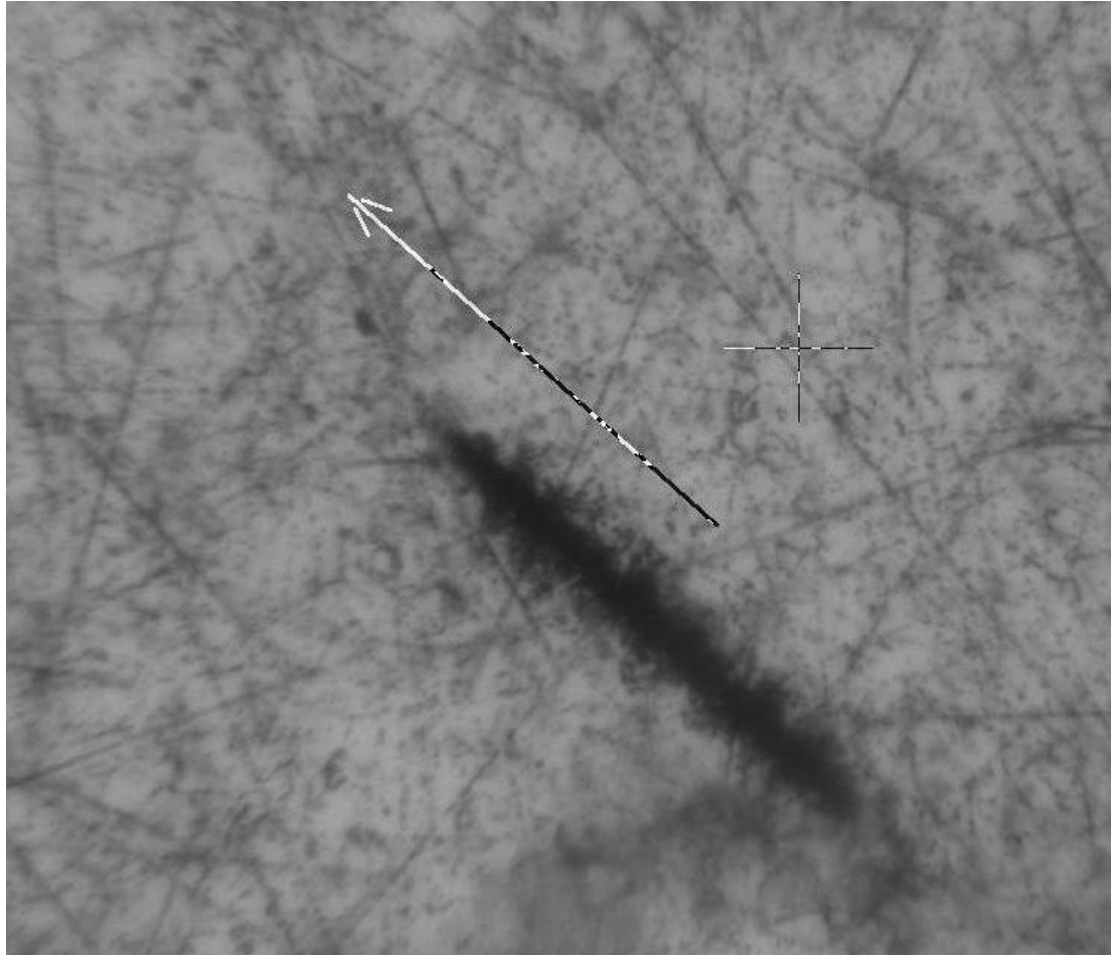
Процедура трекинга – объединение пятен в треки



Как тестировали

- Прямой и обратный трекинг
- Визуальная проверка
- Сравнение с расчетами
- Проверка по эмульсии

Проверка по эмульсии

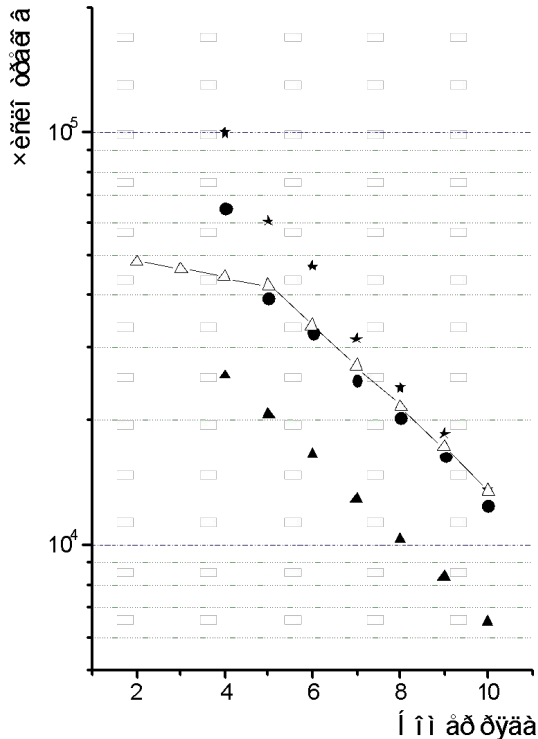


- Во всех 100% случаях были найдены следы в эмульсии по трекам в SXF

Моделирование прохождения тяжелых ядер через камеру

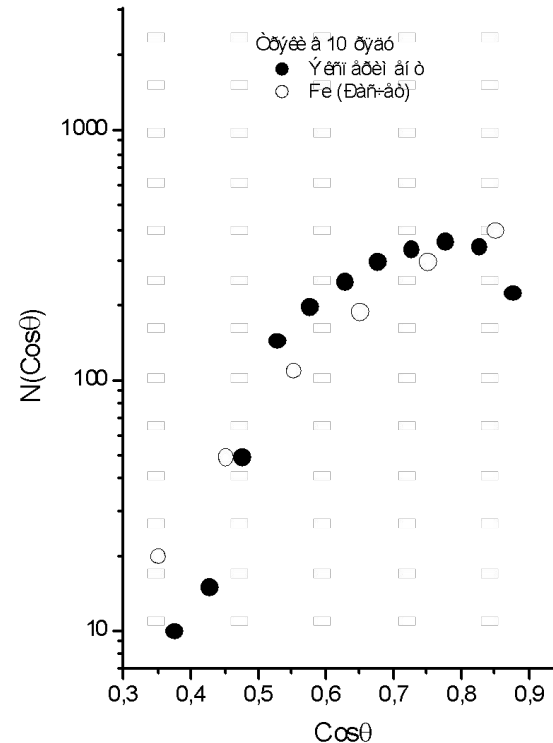
- **Постановка задачи**
- На границу камеры падает спектр протонов, альфа-частиц, CNO, Sub Fe + Fe (от 3 ГВ по жесткости, что)
- Распределение по энергиям: степенной закон (показатель спектра разный для разных групп ядер).
- Угловое распределение по θ изотропно (или соответствует прохождению 10 г/см² атмосферы).
- Угловое распределение по ϕ изотропно.
- Равномерное распределение по поверхности камеры.
- Структура камеры, - слои экранной пленки на определенной глубине

Результаты моделирования



треугольники - $\chi < 50$ мкм, сплошные кружки - $\chi < 100$ мкм, звездочки - $\chi < 150$ мкм, пустые кружки – расчетные значения для ядер железа. $\text{Cos } \theta = 0.3-0.85$

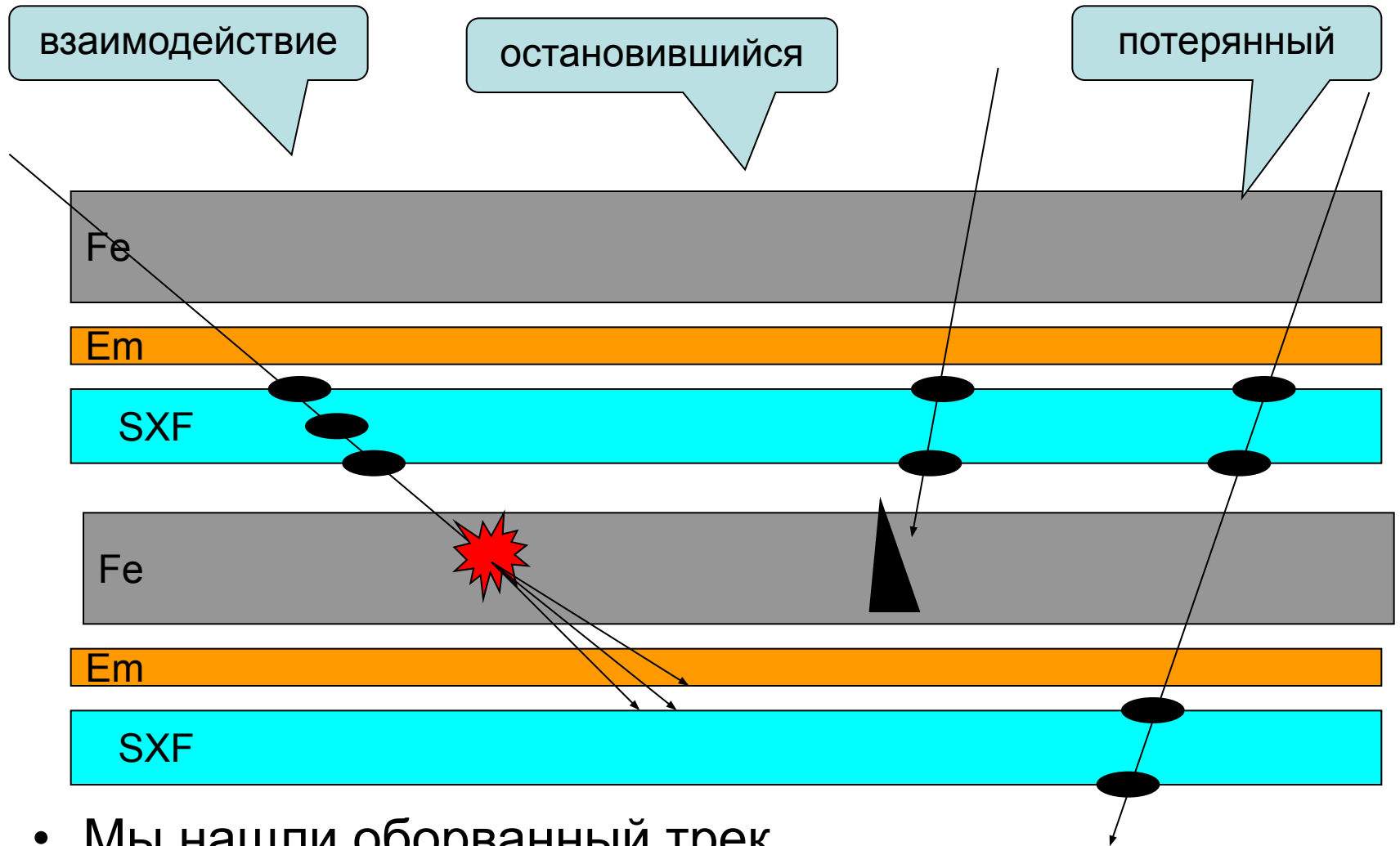
Вывод: $\chi < 100$ мкм хорошо совпадает с ожидаемой интенсивностью треков от ядер железа



Угловое распределение

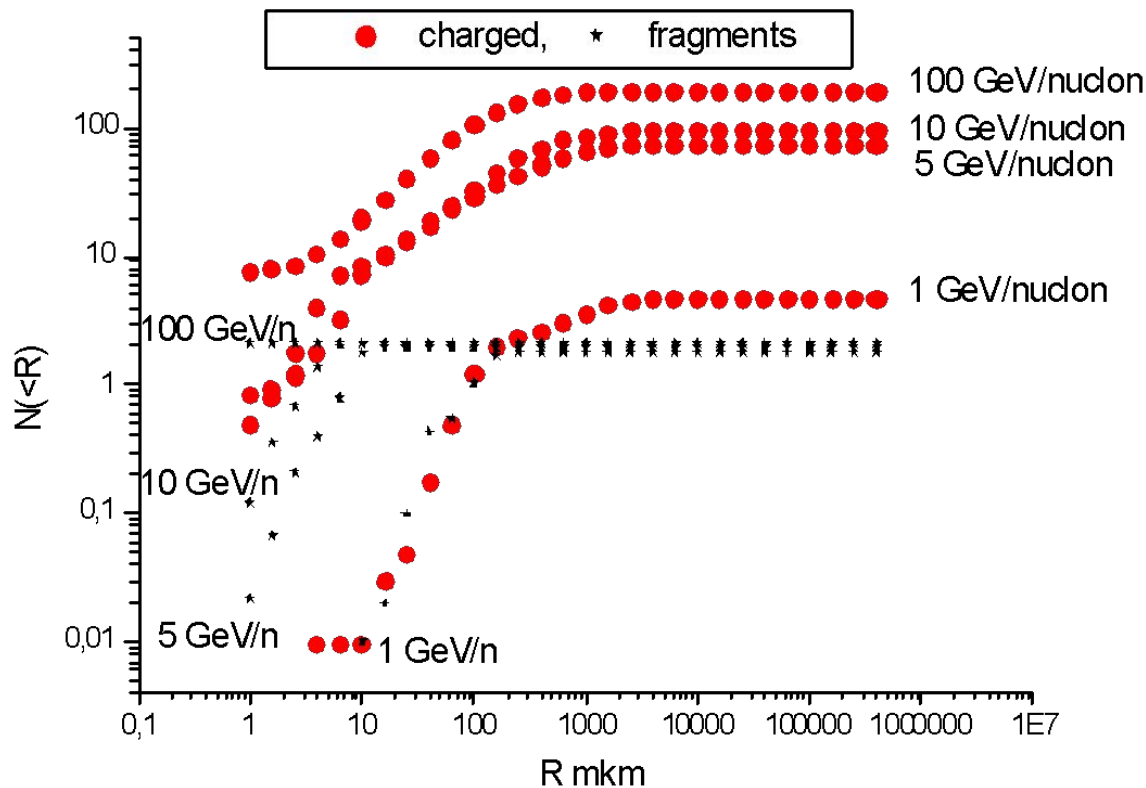
Вывод: теряются частицы под малыми углами вследствие слипания двойных пятен, и треки под большими углами с $\text{Cos } \theta < 0.3$.

Прослеживание в эмульсию



- Мы нашли оборванный трек
- Предсказали в эмульсию

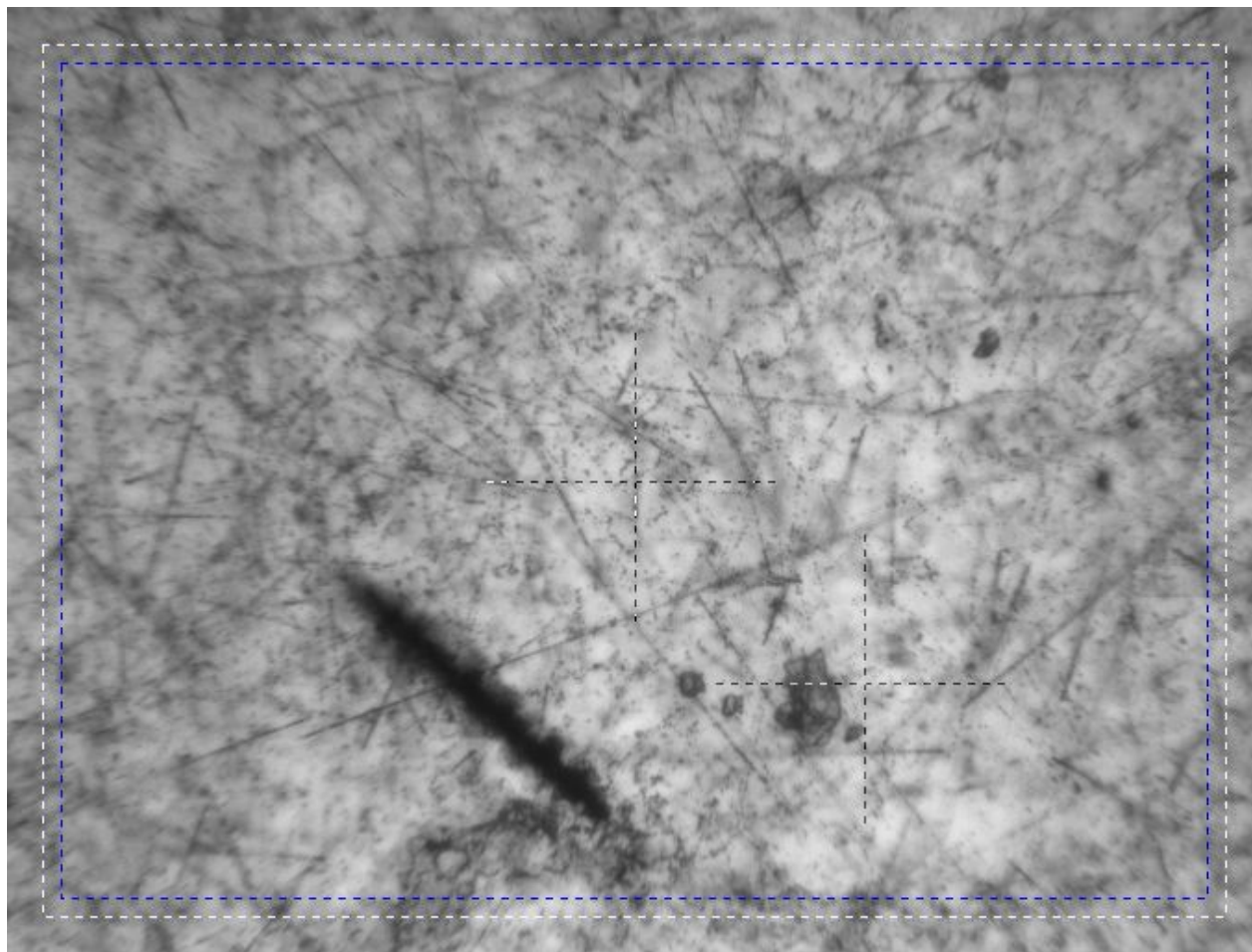
Множественность в Fe+Fe взаим.



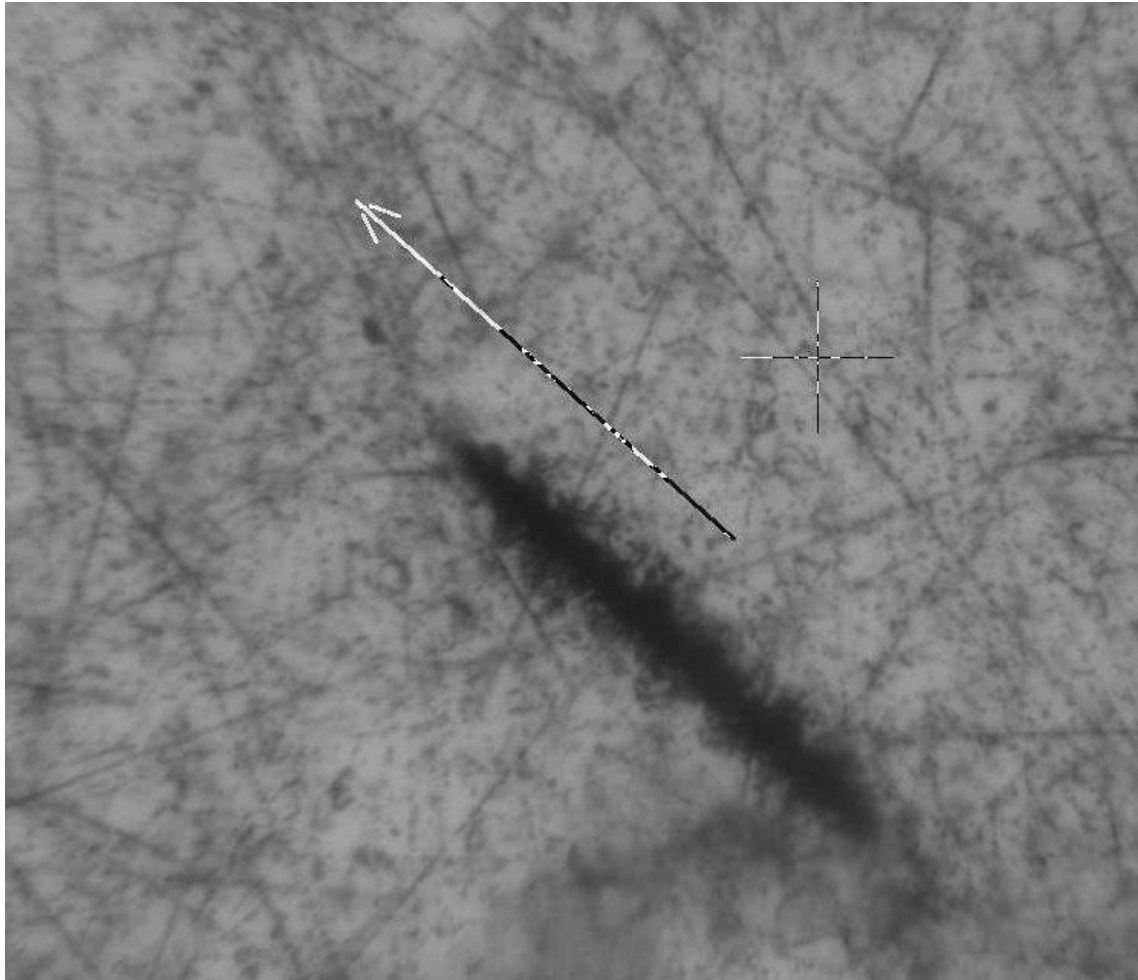
Число вторичных однозарядных частиц (charged) и фрагментов (fragments) в круге радиуса R , образовавшихся в середине слоя стали над слоем ядерной эмульсии для ядер железа разной энергии от 1 до 100 ГэВ/нуклон

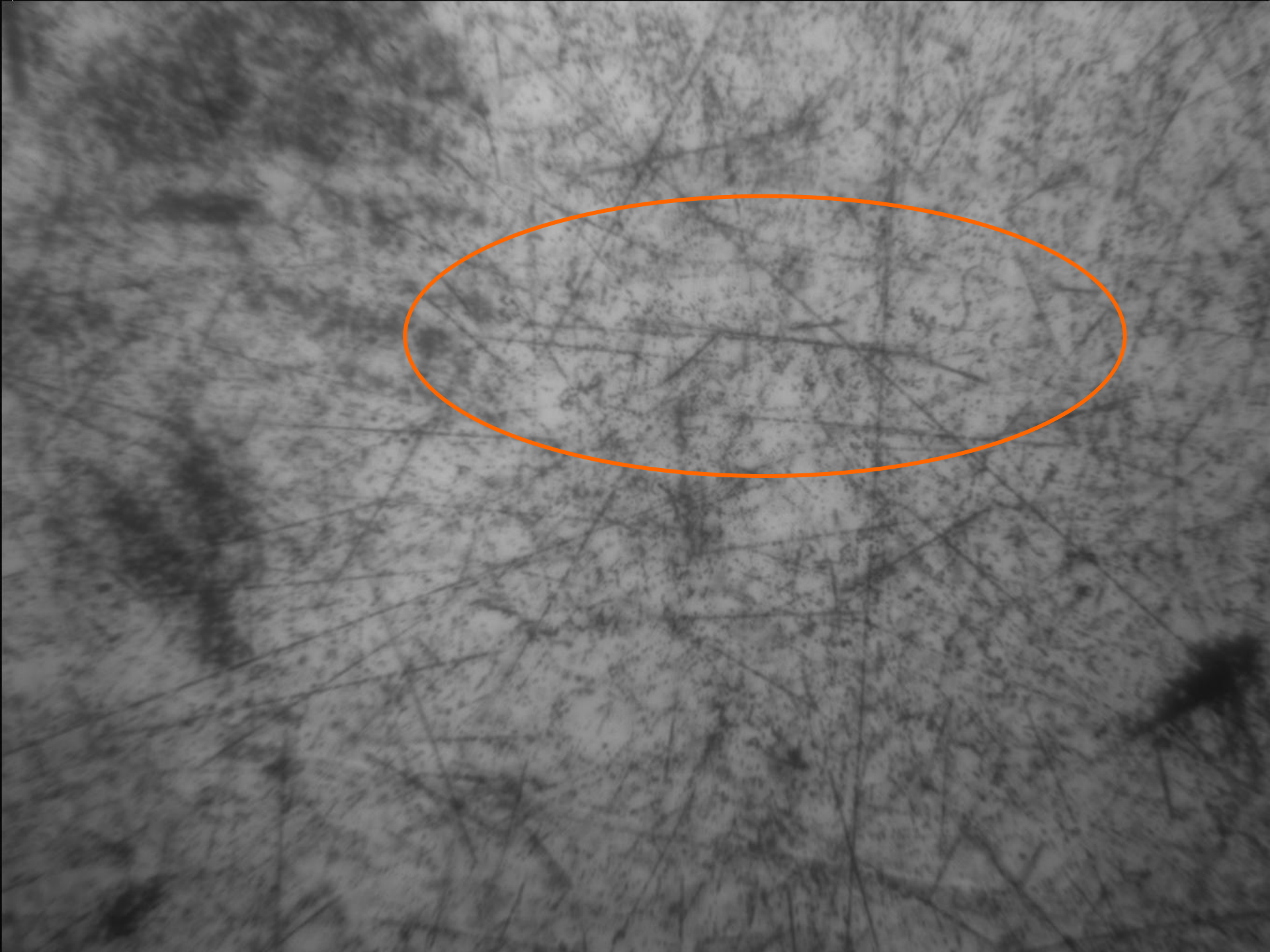
Вывод: отбор вершин взаимодействия в полуавтоматическом режиме может быть проведен только для взаимодействий с энергией на нуклон 5-10 ГэВ, (что означает 300-600 ГэВ на частицу, поскольку только такие события видны в эмульсии как узкая группа вторичных частиц)

Остановившаяся частица



Потерянный трек





Выводы

- 1. Создано ПО для автоматического сканирования и анализа микроизображений в фоточувствительных материалах большой площади (0.5 м²) с высоким пространственным разрешением (7 мкм/пиксель и выше) на большой скорости (16 см²/мин).
- 2. Впервые на базе ПАВИКОМ разработан метод поиска вершин взаимодействий тяжелых ядер, зарегистрированных в SXF пленках эксперимента RUNJOB. Найдены 30 тыс. треков.
- 3. Проведена обработка SXF пленок камеры 1996 г., по ней получены эффективность и ограничения применимости метода в условиях высокого фона ~200 пятен/мм². Показано, что метод может быть применен для получения спектров ядер с зарядом $Z > 17$, $E > 10$ ГэВ/н. Найдено 20 тыс. целеуказаний.
- 4. Проведено сравнение экспериментальных результатов с численным моделированием прохождения ядер через атмосферу и условий регистрации в камере и показано, что наблюдается удовлетворительное согласие распределений, полученных экспериментально и на основе расчётов.