

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



ПРЕПРИНТ

8

П.А. ПУБЛИЧЕНКО, В.А. ДЕРБИНА, Л.Г. СВЕШНИКОВА,
Н.Г. ПОЛУХИНА, К.А. КОТЕЛЬНИКОВ

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ
РЕНТГЕНОВСКИХ ПЛЕНОК**

Москва 2003

Физический институт имени П.Н.Лебедева АН

Отдел космических излучений

П.А. ПУБЛИЧЕНКО*, В.А. ДЕРБИНА*, Л.Г. СВЕШНИКОВА*,
Н.Г. ПОЛУХИНА, К.А. КОТЕЛЬНИКОВ

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВ-
СКИХ ПЛЕНОК

Москва 2002

*- НИИЯФ МГУ

АННОТАЦИЯ

В работе описывается метод автоматизированной обработки рентгеновских пленок на базе современного полностью автоматизированного измерительного комплекса (ПАВИКОМ). Метод позволяет в автоматическом режиме находить на рентгеновской пленке пятна от заряженных частиц, измерять их координаты и величину потемнения D . Описанный метод был применен к обработке эмульсионных данных Российско-Японского баллонного эксперимента RUNJOB. Метод был апробирован на большом числе тестовых измерений рентгеновских пленок, были выбраны оптимальные режимы и параметры работы алгоритма выделения пятен. Приводятся результаты обработки экспозиции RUNJOB 97 года.

Введение.

Оптические методы исследования очень важны в развитии современной науки. Фотография и позднее телевидение, в дополнение к их огромному влиянию в нашей повседневной жизни позволяют наблюдать, записывать и изучать множество интересных явлений. Сейчас нам доступны такие мощные средства исследований, как оптоволокно, оптоэлектрические устройства, позволяющие оцифровывать оптическое изображение и обрабатывать это изображения на компьютере. На этом пути, со времен ранних этапов развития ядерной физики, регистрация субатомных частиц и изучение их траекторий часто базировались на технике визуального наблюдения. Типичный пример техники ядерной эмульсии: заряженная частица, пересекая пленку, формирует скрытое изображение в фоточувствительных микрокристаллах соединения брома. После проявления, на оптическом микроскопе при большом увеличении виден след частицы в виде цепочки черных блобов. Такая техника развивалась и совершенствовалась на протяжении десятилетий, и используются в настоящее время в космических лучах и на ускорителях благодаря высокой информативности этих методов, возможности анализировать отдельные события с высокой множественностью вторичных частиц, измерять импульсы частиц и т.д. Вместе с тем, эмульсионные методы до самого последнего времени требовали применения тяжелого визуального труда при обработке первичного экспериментального материала. Однако благодаря высокому уровню современных прецизионных измерительных механических систем, средств вычислительной техники и оптоэлектронных приборов оказалось возможным осуществить достаточно полную автоматизацию труда измерителей.

1. Метод регистрации частиц в вершинном триггере.

Настоящая работа посвящена методике обработки и анализа экспериментального материала, полученного в аэростатном Российско-Японском эксперименте RUNJOB [1,2]. Это сотрудничество было организовано в 1995 году и посвящено поэлементному изучению энергетического спектра первичных космических лучей (ПКЛ) в диапазоне энергий от 20 до 500 ТэВ. Измерения энергетических спектров ядер в области высоких энергий представляет огромный интерес для выяснения механизмов ускорения, прохождения через межзвездную среду и природы источников космических лучей. Особенно интересны соотношения интенсивностей группы легких ($Z=17-24$) и тяжелых ядер ($Z>24$). За 5 лет было совершено 10 успешных аэростатных полетов, суммарная накопленная экспозиция - 575 м²ч. В данной работе обсуждаются результаты обработки экспериментального материала стратосферных камер полетов аэростатов в 1997 году.

В эксперименте основным детектором регистрации частиц служит триггер отбора частиц по энергии, выделенной в электромагнитную компоненту в калориметрическом блоке установки. Традиционный метод регистрации по каскадам в калориметре имеет высокий энергетический порог (~20 ТэВ) и большую неопределенность в определении энергии. Наряду с этим методом, существует возможность регистрировать частицы непосредственно в мишенном блоке с помощью специальных фоточувствительных материалов. Такой «вершинный триггер» позволяет снизить порог регистрации частиц до **100 МэВ** и измерить в рамках одного эксперимента поэлементные энергетические спектры ядер с $Z > 17$. В детекторах вершинного триггера используют особые наборы из двухслойных рентгеновских пленок, окруженных с обеих сторон сцинтилляционными экранами (пленки экранного типа или SXF) [3]. Ядра высоких энергий с $Z > 17$, проходя через такой набор, вызывает сцинтилляцию экранов, засвечивающих пленку

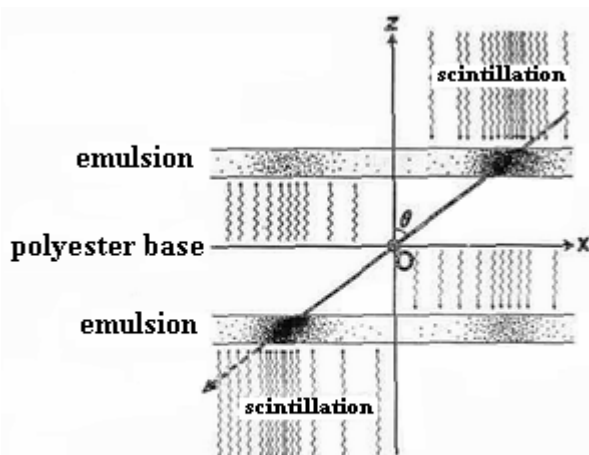


Рис. 1. Структура SXF.

выделить траектории частиц, определить их заряд, а по резкому скачку потемнения находить точки взаимодействия первичных ядер с ядрами атомов мишенных слоев.

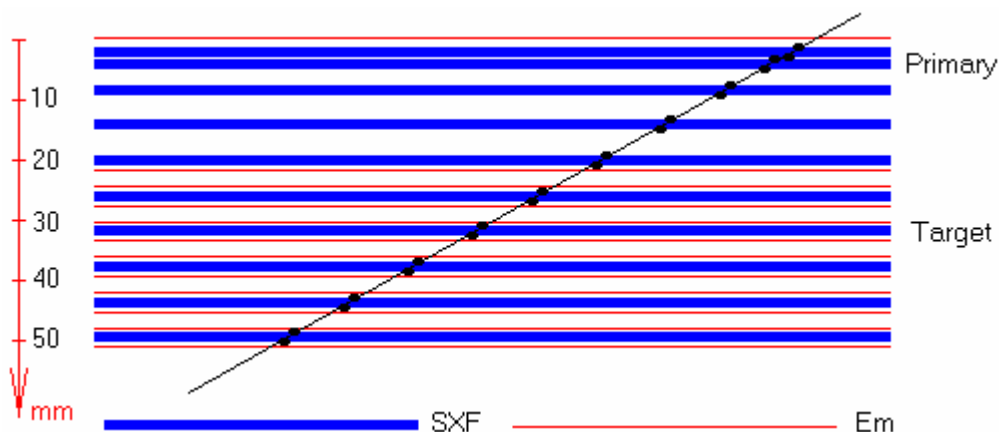


Рис. 2. Расположение экранных пленок (SXF) и ядерных пленок (Em) в первичном и мишенном блоках установки.

Схема мишенного блока установки показана на рис. 2. Первичный (Primary) и мишенный (Target) блоки содержат 10 рядов SXF. В промежутках между экранными пленками находятся 1-мм листы железа (которые не показаны на рис. 2), эмульсионные пленки (Em) и углерод (оргстекло). Высота мишенного блока 510 мм, размер пленки 400x500 мм. Экранные пленки фиксируют частицы трех типов: тяжелые частицы, которые проходят через детектор без взаимодействия, частицы, взаимодействовавшие и прошедшие через детектор и малоэнергичные частицы, остановившиеся в мишенном блоке. В задачу детектора входит разделение этих событий разного рода. Измерение и анализ распределения пятен потемнения в рентгеновских пленках первичного и мишенного блоках установки позволяют определить точки взаимодействия ядер космических лучей.

Плотность пятен в рентгеновских пленках очень высока и составляет приблизительно 200 пятен на см², образованных ядрами космических Лучей, поэтому измерение пятен потемнения на всех пленках камеры, восстановление пространственных положений следов ядер в объеме камеры и поиск точек взаимодействия ядер в мишенных слоях представляют собой очень сложную работу и практически невыполнимую при ручной обработке задачу, которая может быть выполнена при помощи современных полностью автоматизированных систем типа ПАВИКОМ [5,6].

2. Измерительная система.

Для обработки вершинного триггера необходимо измерить координаты пятен по всем 10 слоям экранной пленки. Используя полученный таким образом банк данных, специальная программа *трекинг* позволяет восстановить пространственные положения всех следов ядер, пересекающих камеру.

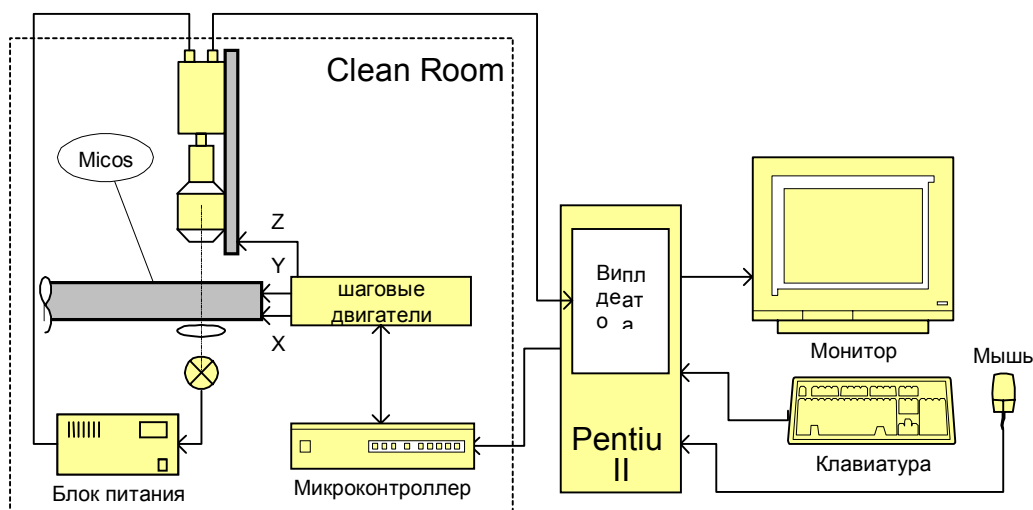


Рис. 3. Схема установки.

При ручном способе измерений оператор визуально проводит фокусировку объектов и совмещает положение измерительного креста с центром изображения пятна, считывает показания микроинтов и вручную записывает координаты. При измерении на полуавтоматах значения координат пятен вводятся в компьютер по командам оператора. Однако, значительно большая эффективность обработки достигается при проведении измерений на полностью автоматизированных установках, на которых весь процесс измерений, включая анализ оптического изображения измеряемых объектов, осуществляется в автоматическом режиме, без участия оператора. Такая автоматическая измерительная система была создана в ФИАН, имеет кодовое название ПАВИКОМ. Основные узлы установки — автоматический прецизионный стол MICOS, оптическая система, оснащенная CCD-камерой, персональный компьютер Pentium II-400/128/8Gb, плата оцифровки видеоизображения Candella DIGITEYE DE-18.

Прецизионная механическая система MICOS является уникальным в своем роде оборудованием в РФ и обладает высокой точностью измерений координат. Стол состоит из массивной платформы и подвижного предметного стола, пределы перемещения которого в горизонтальной плоскости 400 мм x 800 мм. Над столом закреплена CCD камера с возможностью перемещения по вертикальной плоскости по Z-координате в пределах 0÷200 мм. Координаты по всем трем осям измеряются с точностью 0.5 мкм. Виброустойчивость стола достигается большой массой установки (~ 1 т) и применением пневматических амортизаторов. Для уменьшения теплового расширения портал для крепления микроскопа выполнен из гранита. Управление столом осуществляется как с компьютера, так и в ручном режиме с помощью джойстика.

Используемая в системе камера (Soling WAT-902A 597x537x8bit) представляет собой устройство на основе ПЗС матрицы с пространственным разрешением 597x537 пикселей и глубиной цвета 8 бит (256 градаций

серого). Изображение на ПЗС матрице создает объектив микроскопа, дающий двукратное увеличение (x2). Аналоговый видео сигнал, формируемый видеокамерой, передается на вход карты оцифровки и захвата изображения (Candella DIGITEYE DE-18).

Карта производит оцифровку видео сигнала с разрешением 384x288 пикселя (максимальное 768x576), передает эти данные в память компьютера, выводит оцифрованный видео сигнал в «живом окне» на монитор (в режиме DirectDraw, без участия процессора).

3. Программное обеспечение.

Программное обеспечение написано для операционной среды Windows 95/98 на объектно-ориентированном языке C++ с использованием контейнеров и методов стандартной библиотеки шаблонов (STL).

Изображение поля зрения микроскопа передается на компьютер и выводится на экран монитора. Размер поля зрения 3.8x3 мм². Сканирование всей пленки происходит последовательно шаг за шагом. На каждом шаге программа анализирует захваченный кадр, записывает информацию обо всех найденных пятнах в файл. После того как произошел захват изображения, программа дает команду двигателям стола, и в поле зрения объектива оказывается новый участок пленки. Перемещение с одного кадра на другой при скорости перемещения 2 см/сек занимает ~2 сек (основное время уходит на разгон и торможение), обработка кадра (<<1сек) ведется во время перемещения стола. Общее время сканирования одной пленки — 150x150x2 = 45000 сек = 12,5 часа.

Для привязки системы координат стола к системе координат сканируемой в данный момент пленки, перед началом процедуры измеряются координаты левого и правого нижних углов пленки (a₁,b₁) и (a₂,b₂). Переход от измеренных координат в системе стола к координатам в системе пленки осуществляется по формуле:

$$x = a_1 + \cos \varphi a + \sin \varphi b, y = b_1 + \cos \varphi b - \sin \varphi a, \text{ где } \varphi = \arctg(b_2 - b_1 / a_2 - a_1)$$

Общая система координат для всех 10 пленок строится по специально отобраным опорным трекам не взаимодействовавших частиц. Такие треки ищутся в полуавтоматическом режиме до этапа массовых измерений. По найденным опорным трекам производится процедура «сшивки» слоев камеры, которая вычисляет относительные сдвиги и повороты пленок камеры относительно друг друга, устанавливая их в единой системе координат.

4. Алгоритм детектирования пятен.

Алгоритм детектирования пятен является центральной моментом программы автоматической обработки рентгеновских пленок эксперимента RUNJOB. От правильности работы этого алгоритма зависит набор статистики по пятнам, эффективность программы трекинга и адекватность конечных результатов.

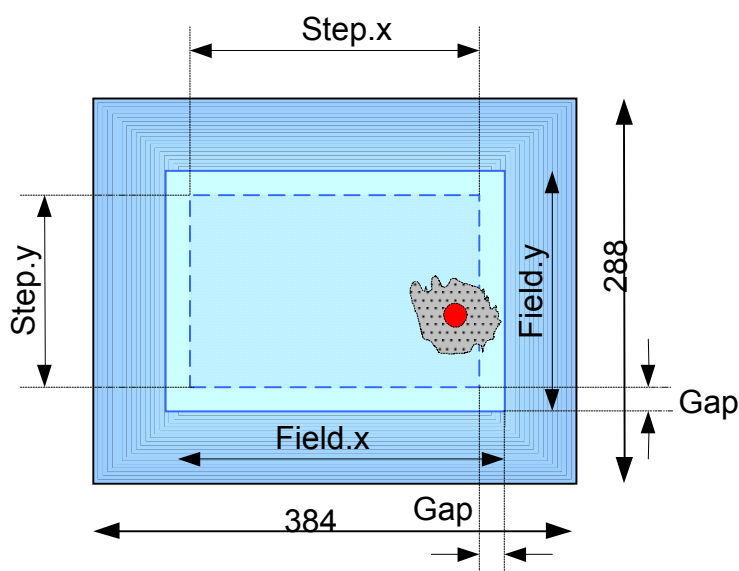


Рис. 4. Разбиение поля кадра на области.

На каждом шаге сканирования оцифрованный кадр хранится в двумерном массиве $G[i][j]$ 384 x 288 байт, каждый байт которого содержит информацию о цвете пикселя в градациях серого (интенсивности) от 0 до 255 (0 - черный, 255 – белый). 1 пиксель оцифрованного изображения соответствует примерно $10 \times 10 \mu^2$ площади пленки. Такая детализация о структуре изображения используется для определения образа пятен. Пятно определяется как кластер, если на данном кадре соблюдаются два условия: кластера имеет размер не менее 6×6 пикселей ($60 \times 60 \mu^2$) и интенсивность пикселей кластера не ниже фонового порога. Весь кадр изображения 384 x 288 пикселей делится на области *рабочего поля* *Field* и вложенную в нее область гарантированного попадания пятна (см. рис. 4). Анализ изображения происходит только в рабочей области. Ограничение кадра до рабочего поля было необходимо ввести, для того чтобы исключить нерезкие участки изображения по краям кадра; координаты поля $Field = (20, 384-20) \times (20, 288-20)$. Анализ изображения ведется только в рабочей области. Найденные пятна в рабочей области считаются зафиксированными в кадре, если их центры не выходят за границы гарантированной области попадания. Это исключает неправильное определение центра пятна, если оно вошло не полностью в текущий кадр. Размеры гарантированной области попадания

таковы, что пятно с центром на границе области, полностью вмещается в *рабочего поле Field*. Границы области задаются отступом *gap* от края рабочего поля ($gap = 10$ пикселей). Шаг сканирования равен размеру области гарантированного попадания пятна.

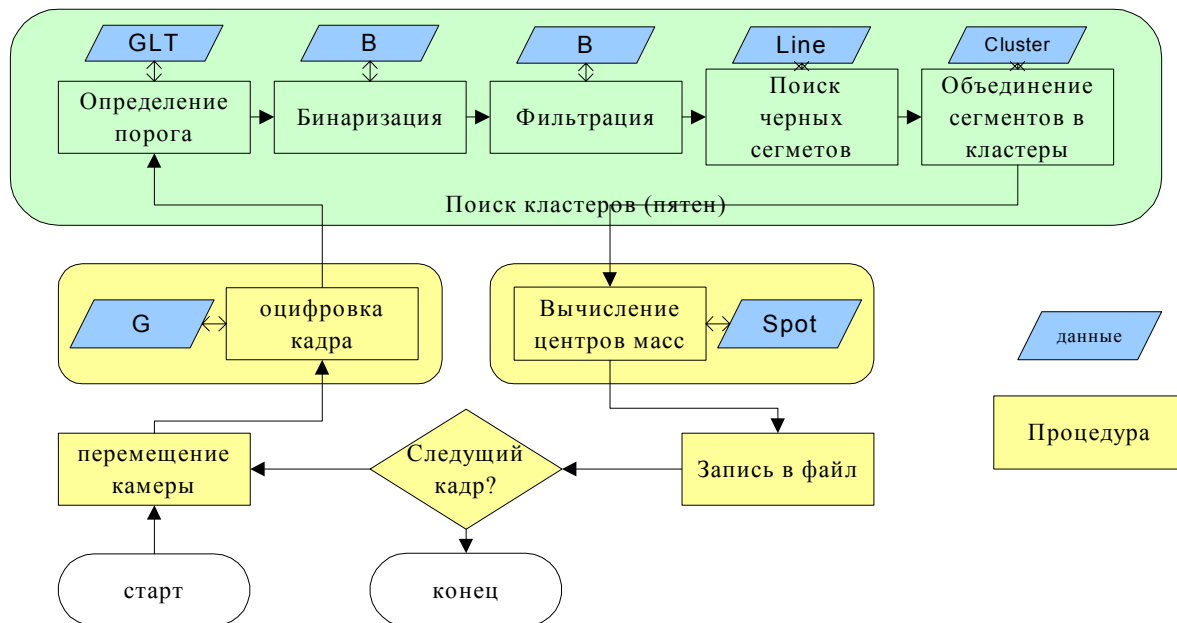


Рис. 5. Блок-схема алгоритма.

Для определения точного размера кадра изображения в единицах координатной системы стола Micos (мкм), применяется следующая процедура. Оператор отмечает на экране курсором некоторое пятно. Фиксируется положение камеры (x_1, y_1) [мкм] и координаты пятна в кадре (a_1, b_1) [пиксели]. Камера смещается на $(\Delta x, \Delta y)$ так, что это пятно остается в кадре и вновь определяются его координаты (a_2, b_2) . Реальный размер кадра: $Width = (384) \times \Delta x / (a_2 - a_1)$, $Height = (288) \times \Delta y / (b_2 - b_1)$

Весь алгоритм обработки делится на следующие этапы: 1) бинаризация (binarization), 2) кластеризация (clustering), 3) фильтрование кластеров, 4) нахождение центров масс получившихся кластеров. Блок схема алгоритма изображена на рис. 5.

1) Бинаризация состоит в получении бинарной (двухцветной) картинки черных («1») и белых («0») пикселей. Вводится порог, лежащий от 0 до 255; сравнивая интенсивность (уровень серого) пикселей с введенным фоновым порогом GLT (Gray Level Threshold), пиксели разделяются на «черные» (bit-1 ниже порога) и «белые» (0-bit выше порога). После такой процедуры получается массив последовательности нулей и единиц, V [ширина, высота], - черно-белая картинка.

Для учета неравномерности освещения фоновый порог определяется в подокнах, на которые делится рабочая область кадра (2 x 2 подокна).

Уровень фона определяется по преобладающему (наиболее вероятному) значению интенсивности пикселей текущего кадра. Этот цвет определяется по максимуму распределения уровня серого пикселей кадра (pixel intensity distribution). Чтобы избежать возможных вариаций максимума, гистограмма аппроксимируется нормальным распределением, и за максимум принимается медианное значение кривой распределения. Фоновый порог полагается кратным уровню фона, - 11/16, 12/16, 13/16 и т.д.

$$Max = \frac{\sum_{i=0}^{255} i \times Bin[i]}{\sum_{i=0}^{255} Bin[i]}, \quad GLT = Max \times Factor; \quad Factor = 1/16, 2/16, \dots 16/16.$$

2) Следующий этап – выделить в двумерном массиве $V[i,j]$ связанные образования единиц, - кластеры. Любой такой кластер можно представить в виде ряда горизонтальных «черных» сегментов (связанных последовательностей «1»). Итак, анализ уже «черно-белой» картинки состоит из строчного поиска «черных» сегментов и их дальнейшего объединения в кластеры. В каждой строчке изображения сегменты нумеруются, для каждого сегмента сохраняется его начало и конец, - массив L [высота, сегмент в строке].

Сегментам первой строчки изображения необходима инициализация, - каждому сегменту назначается индивидуальный номер будущего кластера. Далее, если предыдущая строка пустая, то все сегменты принадлежат новым кластерам и инициализируются дальше. Иначе, производится поиск перекрывающихся сегментов: если i -ый сегмент текущей строки перекрывается «сверху» j -ым сегментом, то i -му сегменту назначается номер j -го сегмента. Необходимо проверить все комбинации между сегментами соседних строк. Для выделения кластеров сложной формы применяется рекурсивный анализ. Окончательно мы получаем массив сегментов, принадлежащих каждому своему определенному кластеру. Используя эту информацию, создается массив кластеров C [кол-во кластеров, кол-во пикселей в кластере]. Этап кластеризации на этом заканчивается.

3) Частицы с малым углом падения $\theta \sim 10^\circ$ будут создавать примыкающие друг к другу пятна (средний размер пятна около $d=50$ мкм, толщина подложки экранной пленки $L=170$ мкм, $tg \theta_{min}=(d/2)/L, \rightarrow tg \theta_{min} = 8^\circ$). Такие пятна могут слиться в один кластер и чтобы разделить сдвоенные пятна, необходима специальная процедура проверки. Процедура выявляет «тонкие перешейки» в кластерах и удаляет их. Все изображение разбивается на «черные» сегменты (см. выше), причем как горизонтально, так и вертикально. Сегменты с длиной меньше заданной удаляются ($l \leq 2$). В итоге контуры кластеров сглаживаются, а «слипшиеся» кластеры разделяются.

4) На завершающем этапе создается массив идентифицированных пятен. Для каждого кластера вычисляется его центр масс по всем его n

пикселям с весовыми коэффициентами $255-G[i,j]$, где $G[i,j]$ – интенсивность пикселя:

$$X = \frac{\sum x_n (255 - G_n)}{\sum (255 - G_n)}, \quad Y = \frac{\sum y_n (255 - G_n)}{\sum (255 - G_n)}, \quad (x_n, y_n) - \text{координаты } n\text{-го пикселя.}$$

За пятна принимаются кластеры больше заданного размера S в пикселях ($S > 40$). За координаты пятна принимаются координаты центра масс кластера. Среднее кол-во пятен регистрируемых в одном кадре при факторе порога $F=12/16$ около 10.

Для каждого пятна вычисляется значение потемнения в центре и среднее по всему пятну. За центр принимаются центральные 25 пикселей.

$$D = \lg G_{back} - \lg \langle G_{cluster} \rangle, \quad \langle G \rangle_{center} = \frac{1}{25} \sum_{i=-2, j=-2}^{i=2, j=2} G[x_c + i][y_c + j],$$

где $G = 0-255$, G_{back} – значение потемнения для фона, $G_{cluster}$ – значение потемнения для кластера

Для небольших кластеров потемнение, определенное в центре, совпадает со средним по всему пятну. Среднее потемнение по пятну всегда меньше потемнения в центре.

Массив найденных в кадре пятен $Spot[i]$ записывается в выходной файл данных на каждом шаге сканирования, что исключает потерю информации в случае аварийной ситуации. Для каждого пятна сохраняется следующая информация: координаты, размер в пикселях, значение потемнения в центре и среднее по всему пятну. Размер выходного файла данных около 30 Мб.

5. Анализ работы и результаты.

Для того чтобы проверить надежность алгоритма определения образа пятен и измерения их параметров, был проведен ряд контрольных испытаний. Как выяснилось, на конечный результат измерений влияют ряд факторов. Это настройки оптической системы (условия освещения, фокусировка), блики на пленке, равномерность раскладки пленки на столе, присутствие пыли, низкочастотная наводка на соединительный кабель между камерой и компьютером, стабильность изображения камеры, параметры настройки платы оцифровки и другие факторы. Для набора статистики по всем сканируемым пленкам преобладающее значение имеет неизменность условий измерений для всей процедуры от начала и до конца.

Накал лампочки подсветки регулируется напряжением блока питания УБПН-3, который гарантирует стабильное напряжение на весь период измерений. Постоянство фокусировки обеспечивается жестким креплением камеры и высокой координатной точностью стола Micos. От попадания пыли на измерительный стол защищает «чистая» комната (clean room), в

которую помещена вся измерительная система. Пленка укладывается на стол равномерно, без вздутий, по краям пленка закрепляется к стеклу. Положение пленки измеряется до и после сканирования.

Ключевое положение в методике занимает ССD-камера, которая непосредственно формирует оптическое изображение пленки и получает всю первичную информацию. К сожалению, видеокамера дает непостоянное во времени изображение («живую» картинку), а захваченные в разные моменты кадры одного и того же участка пленки немного отличаются по интенсивности пикселей. Это явление и размытость картинки по краям препятствуют стабильности работы алгоритма. Измерения вариации интенсивности пикселей кадра влияют на определение фонового порога, что в свою очередь изменяет очертания кластеров. Кластеры с интенсивностью пикселей на уровне фонового порога могут пропадать при его слабой вариации, но такие кластеры не фиксируются ввиду малого размера (см. пункт 4 алгоритма). Кластеры, прошедшие отбор по размеру, фиксируются устойчиво и размывание их границ, при сохранении центральной части, не влияет на определении центра пятна, так как роль «периферийных» пикселей кластера незначительна в расчете его «центра тяжести» (см. рис. 5). Таким образом, алгоритм очень устойчив в отношении определения центра пятна. В то же время значения D_{center} и D_{mean} имеют разброс относительно среднего значения при многократных измерениях. D_{center} – значение потемнения в центре, D_{mean} – среднее значение потемнения по кластеру.

Для выяснения разброса значений D_{center} и D_{mean} , проводились тестовые обработки произвольных кадров и определялись характеристики отдельных пятен. Анализ полученных результатов показал, что определяемый размер пятна и значение потемнения флуктуирует от измерения к измерению. На рис. 6, 7, 8 приведено распределение измеренных значений D_{mean} , D_{center} и S в результате обработки одного среднего пятна в серии последовательных 40 измерений. Из графиков видно, что флуктуации есть, но они незначительные для D_{center} относительная ошибка составляет 2%, для D_{mean} – 1%, для S – 5%. Такой разброс в определении характеристик пятна не влияет на результат обработки рентгеновской пленки. Таким образом, методика измерений потемнений D и координат центров пятен оказалась достаточно надежной.

Используемая в работе плата захвата видеокамера имеет три параметра настройки изображения: яркость (-100% ÷ 100%), контраст (-100% ÷ 100%) и цветовая насыщенность (0 ÷ 200%). Каждая из настроек задается значением в диапазоне от 0 до 255. Эти параметры влияют на аппаратную коррекцию изображения, и не связаны с оптической настройкой изображения, которое осуществляется с помощью объектива микроскопа. Аппаратная коррекция выполняет лишь косметическую обработку изображения и не привносит в изображение принципиально новой информации.

Цветовая насыщенность не влияет на величину амплитуды видео-сигнала. Параметры настройки яркости и контрастности в широком диапазоне изменяют интенсивность пикселей кадра изображения, их значения сильно меняют фоновый порог и конечное потемнение D .

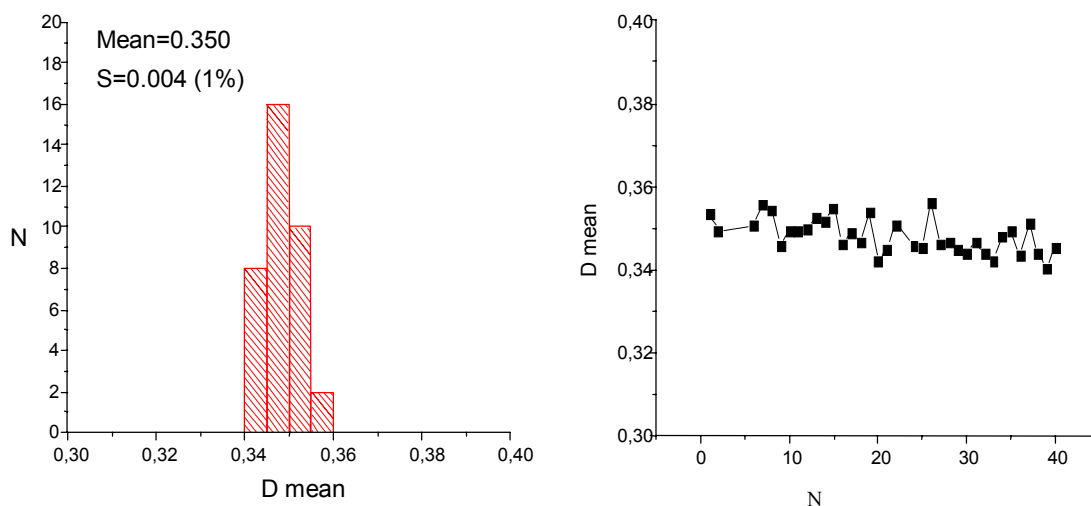


Рис. 6. Флуктуация значения среднего потемнения пятна D_{mean} , где $Mean$ – средняя величина потемнения D , S – среднеквадратичная ошибка, в скобках – относительная среднеквадратичная ошибка.

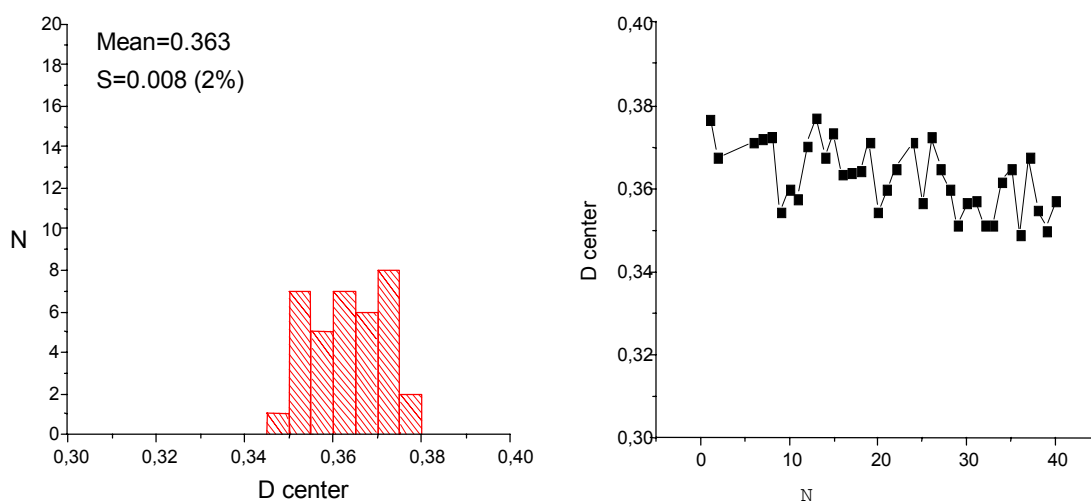


Рис. 7. Флуктуация значения потемнения в центре пятна D_{center} , где $Mean$ – средняя величина потемнения D , S – среднеквадратичная ошибка, в скобках – относительная среднеквадратичная ошибка.

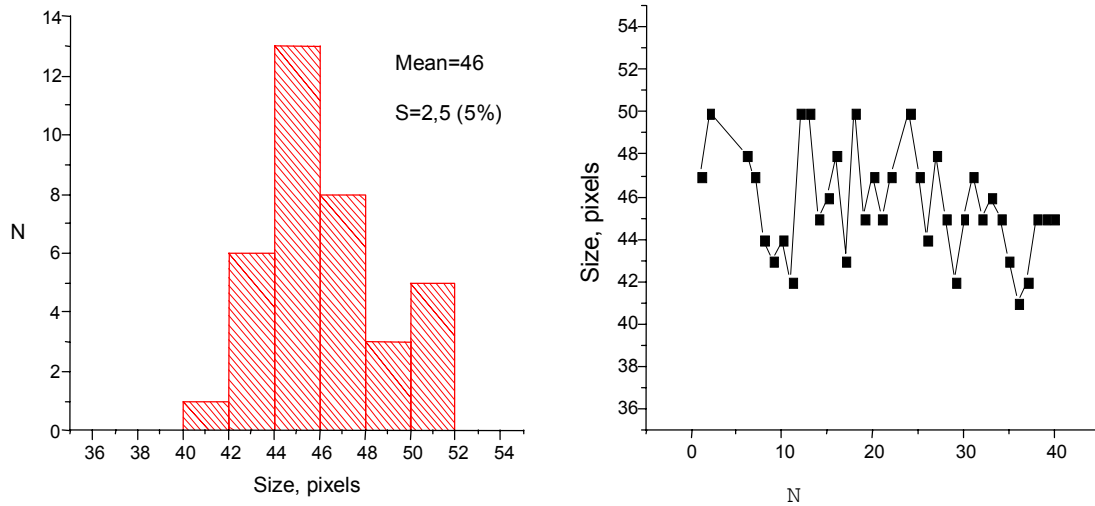


Рис. 8. Флуктуация размера кластера в пикселях $Size$, где $Mean$ – средняя размер кластера в пикселях $Size$, S – среднеквадратичная ошибка, в скобках – относительная среднеквадратичная ошибка.

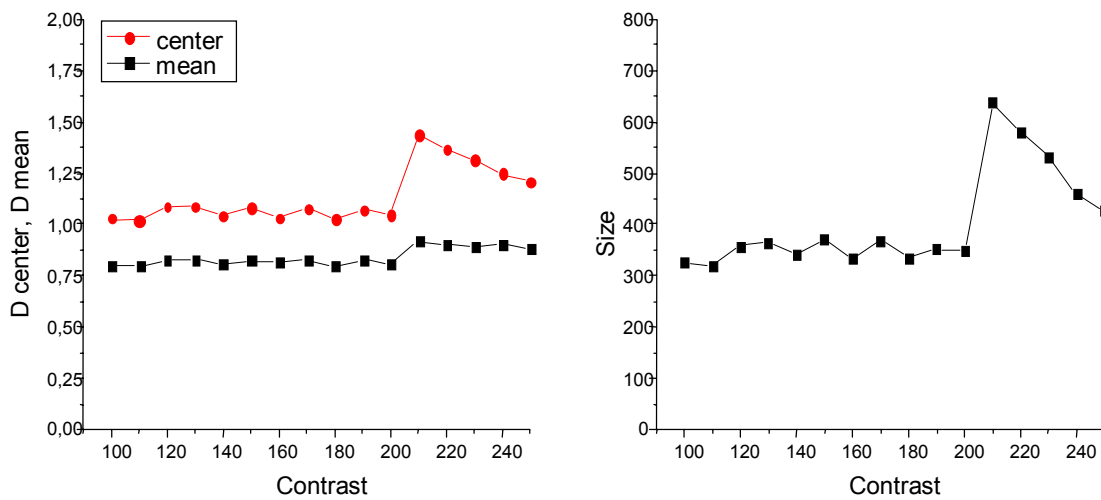


Рис. 9. Зависимость значения потемнения и размера кластера от настройки контраста.
(уровень фона определяется по положению максимума гистограммы распределения яркости пикселей)

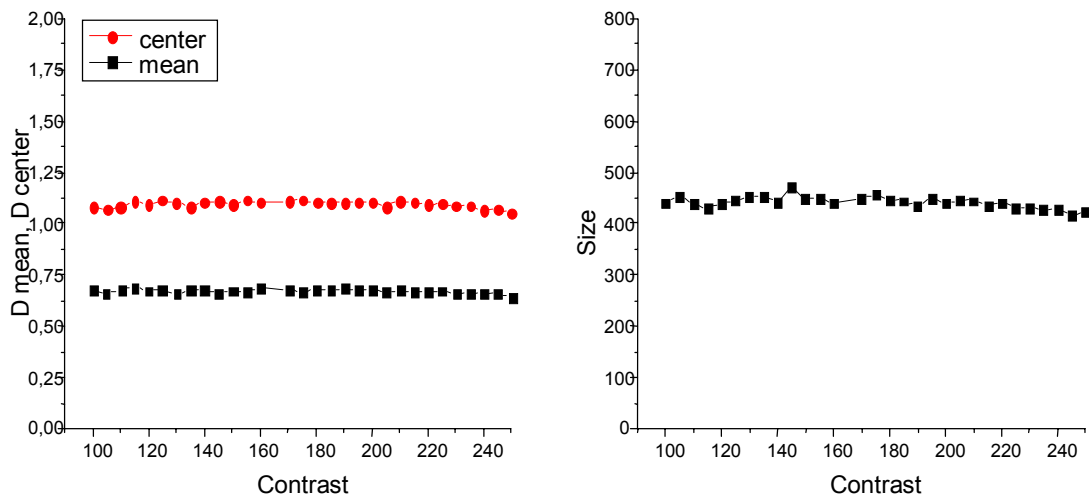


Рис. 10. Зависимость значения потемнения и размера кластера от настройки контраста (уровень фона определяется по положению максимума кривой нормального распределения, которым аппроксимируется распределение яркости пикселей)

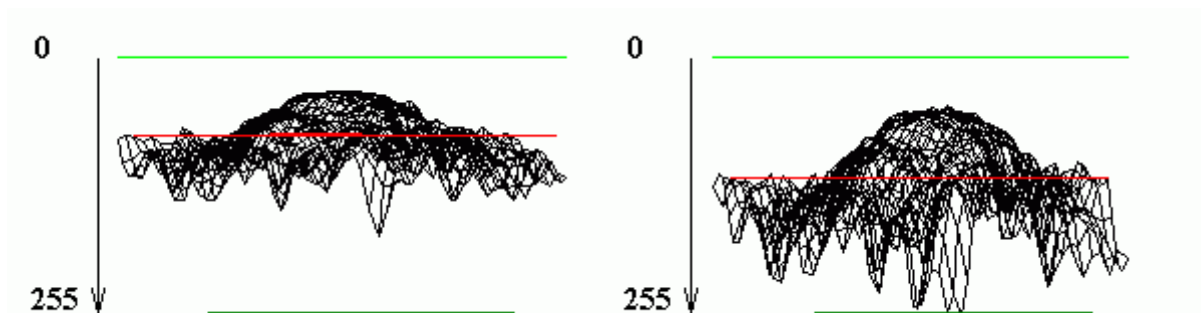


Рис. 11. Трехмерный профиль интенсивности пикселей пятна при двух значениях контраста 128 и 180.

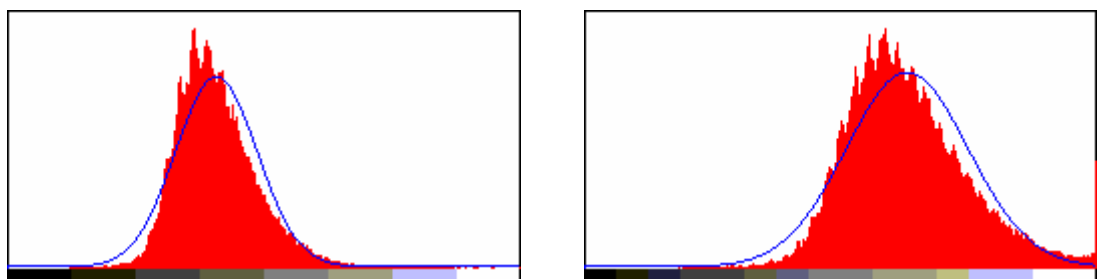


Рис.12. Гистограмма распределения интенсивности пикселей кадра для двух уровней контраста 128 и 180.

Анализируя зависимость потемнения D от яркости и потемнения, были установлены их оптимальные рабочие значения. Крайние значения настроек не подходят для работы алгоритма. Зависимость потемнения и размера кластера от уровня контраста представлена на рис. 9,10. Как видно из графиков, потемнение и размер пятна слабо зависят от этой настройки и практически постоянны во всем диапазоне. На графиках рис. 9 хорошо заметен скачок в области больше 200, который обусловлен описанным выше эффектом насыщения. Таких скачков нет на рис. 10, где зависимость снималась для случая, когда уровень фона определяется по максимуму аппроксимирующей кривой нормального распределения. В широком диапазоне изменения контраста, характеристики пятна не меняются сколько-нибудь значительно, как это видно на рис. 9. Иллюстрацией такой картины служит рис. 11, на котором изображен трехмерный профиль пятна для двух значений контраста. При увеличении контраста профиль пятна растягивается, сохраняя свою форму, и слегка поднимается по интенсивности. Такая динамика мало влияет на отношение $D_{back}/D_{cluster}$ и значение потемнения сохраняется неизменным. D_{back} - значение потемнения фона, $D_{cluster}$ - значение потемнения кластера. Гистограммы распределений интенсивности пикселей для двух значений контраста представлены на рис. 12. С увеличением контраста, гистограмма становится шире, так как увеличивается диапазон возможных цветов (интенсивностей пикселей), что хорошо видно на рис. 11.

Зависимость потемнения пятна от уровня яркости была изучена и представлена на рис. 13, 14 для разных способов определения уровня фона (Алгоритм, пункт 1). Значение среднего потемнения в меньшей степени подвержено колебаниям, чем потемнение в центре. Подъем кривой потемнения в начале графика обусловлен тем, что здесь пиксели пятна быстро достигают нулевого уровня яркости еще при ненулевом уровне фона. Отношение $D = \lg G_{back} - \lg \langle G_{cluster} \rangle$ резко возрастает. С увеличением яркости значение потемнения постепенно спадает, сохраняясь примерно на одном уровне (рис. 13, 14).

При высоких значениях яркости возникает эффект насыщения, - интенсивность большинства пикселей кадра достигает максимального значения 255. В районе насыщения уровень фона скачкообразно принимает значение 255 и больше не меняется при увеличении яркости. Момент насыщения хорошо заметен на графике зависимости размера кластера S от яркости, рис. 13, 14. При скачкообразном увеличении уровня фона до 255, резко меняется порог бинаризации (GLT) и в кластер сразу входит большое число пикселей фона. Если уровень фона выбирать не по максимуму гистограммы яркости пикселей, а аппроксимировать гистограмму нормальным распределением и за уровень фона принимать центр кривой этого распределения, то зависимость D получается сглаженная, без скачков.

Очевидно, работа в области насыщения невозможна для удовлетворительного определения потемнения пятен.

На рис. 11, 12 и 13, 14 можно сравнить результаты двух подходов в определении уровня фона. В настоящей работе был использован второй вариант определения GLT.

Рассмотренные зависимости характеристик пятна от яркости и контраста, (связанные с компьютерной обработкой изображения) позволяют выбрать допустимый диапазон этих настроек для корректной работы алгоритма. Высокий уровень яркости или контраста приводит к эффекту насыщения, поднимая общую интенсивность пикселей кадра до предела (255), и зарезая профиль сверху. Малая яркость зарезает профиль пятна снизу, доводя интенсивность пикселей пятна до минимального уровня (0). При уменьшении контраста, пропадают детали рельефа пятна, хуже выделяются кластеры. Учитывая данный анализ, для работы были приняты средние уровни для контраста и яркости (128, 128), которые отвечают передаче оригинального изображения, без аппаратной коррекции. Данные настройки платы оцифровки, существующие относительные ошибки в определении характеристик пятна (потемнение, размер) и сопутствующие условия работы автоматизированной системы сканирования пленок показывают высокую устойчивость и надежность алгоритма выделения пятен.

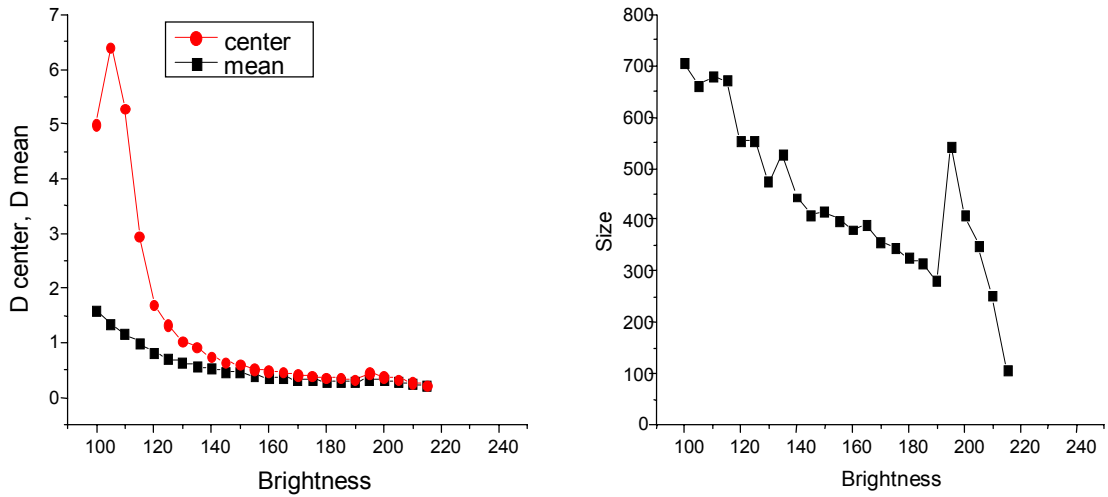


Рис. 13. Зависимость значения потемнения и размера кластера от настройки яркости.
 (уровень фона определяется по максимуму гистограммы распределения яркости пикселей кадра)

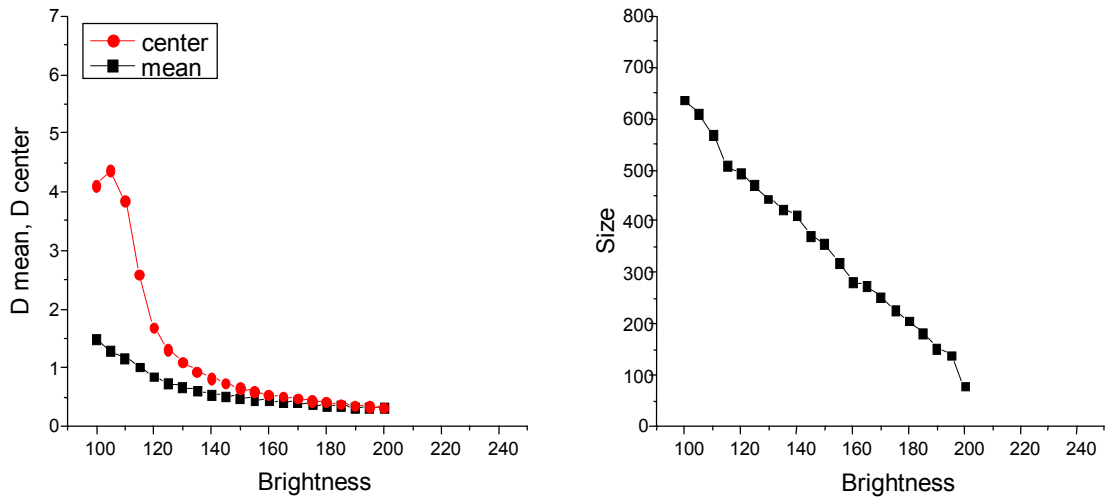


Рис. 14. Зависимость значения потемнения и размера кластера от настройки яркости.
 (уровень фона определяется по максимуму нормального распределения, которым аппроксимируется гистограмма интенсивностей пикселей)

В качестве примера на рис. 15, 16 показан один и тот же кадр до и после обработки. На фоне в центре хорошо видны два больших двойных

пятна и два маленьких. Кластер, находящийся в левом верхнем углу, не идентифицируется как пятно, так как его «центр тяжести» не попадает в гарантированную область захвата пятна. Полное количество пятен, зафиксированной программой в этом примере – 6.



Рис. 15. Исходный кадр до обработки.

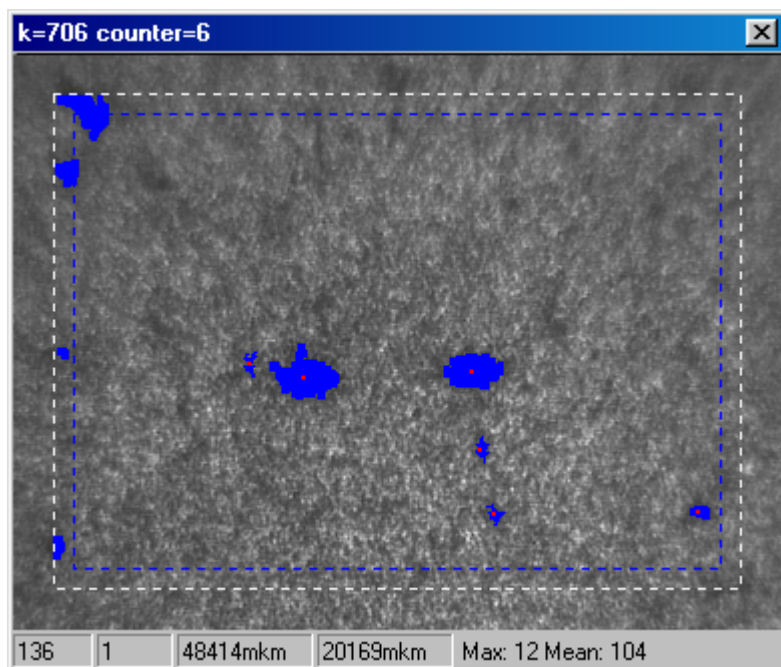


Рис. 16. Кадр, приведенный на рис. 15, после компьютерной обработки по алгоритму.

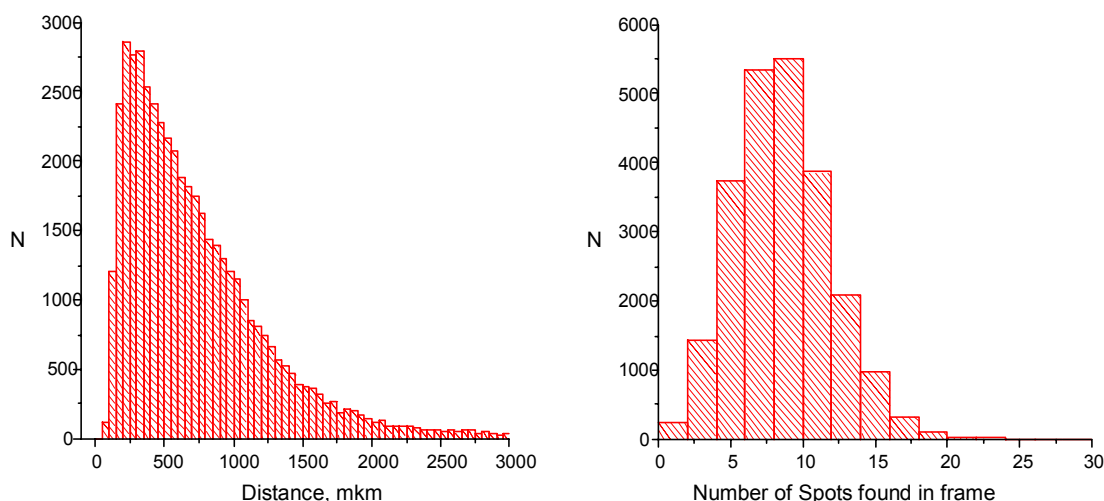


Рис. 17. *Распределение расстояний между соседними пятнами и распределение по числу пятен в одном кадре.*

Используя статистику зарегистрированных пятен в экранных пленках RUNJOB 97, была произведена частичная обработка и анализ характеристик пятен. Важной особенностью для таких пятен является форма распределения расстояний между соседними пятнами. Заряженные частицы, проходя через слой экранной пленки, оставляют в ней след, видимый на просвет как два пятна. Таким образом, большинство найденных пятен должно группироваться по парам и находиться в соседстве с близлежащими пятнами на расстоянии не большем $l \times \operatorname{tg} \theta_{\max}$, соответствующему максимальному углу падения частиц. На рис. 17 приведено распределение расстояний между пятнами. Из этой гистограммы следует, что наиболее вероятное расстояние между пятнами – $R=250$ мкм. Если предположить, что пятна распределены по площади равномерно и не коррелируют друг с другом, то среднее расстояние между ними: $R_{\text{mean}} = \sqrt{S/N} = 1$ мм, где $S = 3.282 \times 2.343 \approx 8$ мкм² – площадь кадра, $N \approx 8$ – среднее количество зарегистрированных пятен в кадре. Такое различие между R_{mean} и R может служить веским основанием о действительной корреляции между пятнами.

На рис. 18 представлена гистограмма распределения потемнения в центре пятна и потемнения среднего по пятну. Гистограмма по среднему потемнению имеет более узкую форму, чем гистограмма по центральному потемнению, так как разброс среднего потемнения меньше. Наоборот, потемнение в центре может принимать более широкий диапазон значений, ввиду большого разнообразия форм пятен («плоские», «выпуклые»). За центр принимаются центральные 25 пикселей пятна. Для маленьких пятен среднее потемнение и потемнение в центре совпадают. Чем больше пятно, тем большая разница между значениями R_{mean} и R_{center} , поэтому среднее значение для $\langle R_{\text{center}} \rangle = 0.6$ лежит правее $\langle R_{\text{mean}} \rangle = 0.4$

На рис. 19 можно увидеть распределение пятен по размеру в пикселях. Слева распределение по размеру выделяемых кластеров ограничено порогом меньше 40 пикселей. Правый длинный хвост распределения включает редкие пятна большого размера, куда ошибочно попадают выделенные кластеры. Максимум распределения приходится на пятна наименьшего допустимого размера. Количество пятен с увеличением размера монотонно убывает в распределении. Как и следовало ожидать, наблюдается резкое падение распределения с ростом размера кластера.

Выводы.

Разработан метод автоматизированной обработки рентгеновской пленки на базе моторизованного подвижного стола с CCD-камерой, в основу реализации метода положен алгоритм распознавания пятен. Для полностью автоматизированной обработки рентгеновских пленок Российско-Японского го эксперимента RUNJOB было разработано программное обеспечение, при помощи которого в автоматическом режиме

а) проводились измерения рентгеновских пленок на установке ПАВИКОМ, при которых оцифрованные оптические изображения вводили в компьютер;

б) используя разработанный и апробированный алгоритм распознавания образа сигнала в рентгеновских пленках от ядерных космических лучей с $Z > 17$, осуществлялся поиск таких ядер;

в) был составлен банк данных по результатам измерений и анализ 10 пленок SXF.

Работа программы апробирована на множестве тестовых измерений рентгеновских пленок, выбраны оптимальные режимы и параметры работы алгоритма и программы в целом. Алгоритм обеспечил стабильную работу комплекса ПАВИКОМ, высокую надежность детектирования пятен и определения характеристик таких пятен с малой относительной ошибкой.

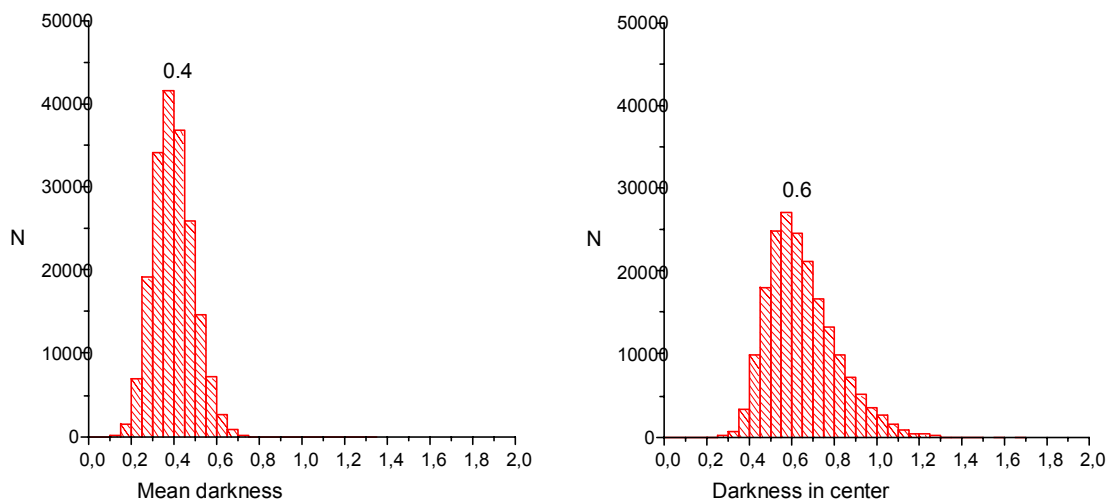


Рис. 18. *Распределение потемнения в центре пятна и распределение среднего потемнения по пятну.*

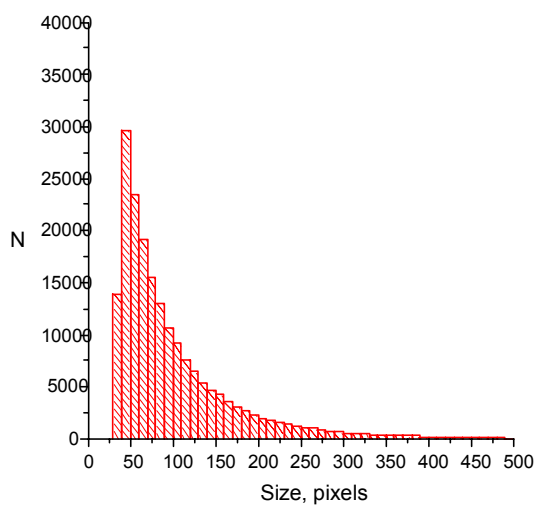


Рис. 19. *Распределение по числу пикселей в пятнах.*

Литература

1. Aranasenko A. et al (RUNJOB Collaboration) *Astrop. Phys.* (2001), v. 6, N 16, p.13 – 46
2. Апанасенко А.В., Публиченко П.А. и др. Исследование первичных космических лучей высоких энергий в российско-японском баллонном эксперименте RUNJOB. Изв. АН сер. физ. 2001, т.63(3), с.433-436
3. M.Ichimura et al. “Posibility of screen-type X-ray film for observation of heavy cosmic-ray primaries”, in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Reseach*, A300(1991) 374-394
4. M.Ichimura et al. “Observation of heavy cosmic-ray primaries over the wide energy range from ~ 100 GeV/particle to ~ 100 TeV/particle: Is the celebrated “knee” actually so prominent?”, in *Physical Review D*, vol.48, 1949, 1993
5. К.А. Котельников и др. «Полностью Автоматизированный Измерительный Комплекс ПАВИКОМ», Наука Производству №12, 2000
6. Goncharova L.A. et al, “Totally automatic system for the nuclear emulsion measurement”, in *XVII meeting of the emul01 collaboration and perspectives of the emulsion technique in the experiments at the nuclotron relativistic nuclear beams. Dubna.* 191, 1999
7. Л.А.Гончарова и др. «Автоматизация измерений и анализ трековой информации об энерговыделении в урановом blanketе электроядерной системы.», препринт ФИАН №25, 2001