

УДК 539.1; 539.1.06; 778.33

## РОЛЬ ПРИВЕДЁННЫХ ВЕЛИЧИН ПОТОКОВ В МЮОННОЙ РАДИОГРАФИИ

Н. И. Старков

*На компьютерном эксперименте наглядно показано, что использование приведённых величин потоков позволяет устранить влияние формы изучаемого объекта на оценку плотности его материала методами мюонной радиографии.*

**Ключевые слова:** мюонная радиография, поиск ископаемых, распознавание образа.

Принцип действия мюонной радиографии основан на просвечивании объектов потоками мюонов от источника или вторичного космического излучения. Большая проникающая способность этих частиц позволяет, в принципе, выявлять неоднородности плотности внутри протяжённых объектов, что крайне важно при исследовании недр Земли, вулканов [1], производственных сооружений [2] и других объектов, подверженных старению, износу и т.п. Пространственное распределение космических мюонов таково, что они летят со всех сторон, в том числе из-под Земли. Правда, поток последних крайне мал и им можно пренебречь. В качестве регистрирующих устройств на ранних стадиях использовались электронные приборы. В настоящее время для этого всё шире применяются также ядерные фотоэмульсии. В данной статье мы не будем касаться конструкции детекторов, а будут рассмотрены некоторые особенности обработки полученных данных, не привязанные к конкретной реализации регистрирующих устройств.

Рассмотрим следующий модельный эксперимент (рис. 1). Пусть нам дан протяжённый объект (тёмно-серая область I на рис. 1), в котором размещены два других объекта меньшего размера: чёрный и светло-серый (области II и III на рис. 1, соответственно). Будем рассматривать их как области с разной степенью поглощения мюонов, причём степень поглощения, т.е. “плотность материала” пусть будет пропорциональна степени почернения области G. Пиксели изображений обычно характеризуются степенью яркости B, которая для нашего 8-битного представления связана с  $G=255-B$  и изменяется в пределах от 0 (чёрный пиксел) до 255 (белый пиксел).

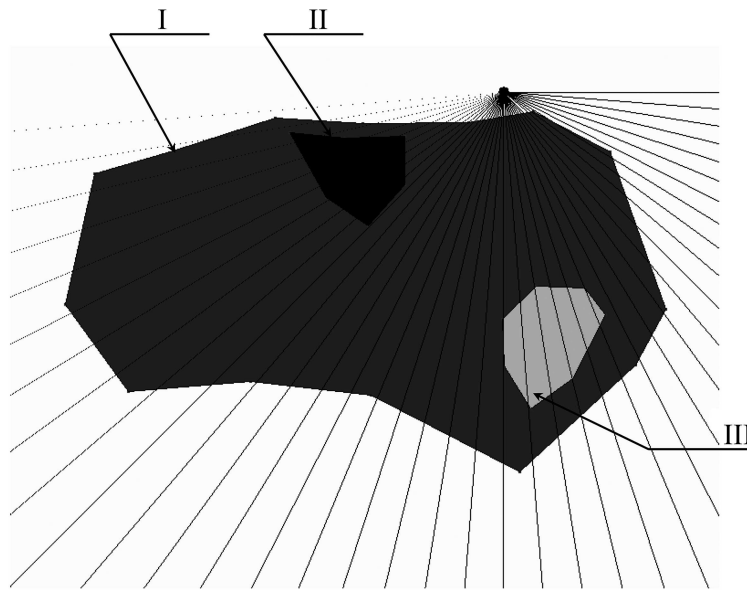


Рис. 1: Схема установки мюонной радиографии. Показаны три области, облучаемые космическими мюонами: I – протяжённый объект, II – включение большой плотности, III – включение небольшой плотности. Лучи – траектории космических мюонов. Чёрный кружок – детектор.

Чёрный кружок в верхней части рисунка – “детектор” мюонов. Прямые линии на рис. 1 демонстрируют траектории “космических мюонов”, регистрируемых “детектором”. Угол луча  $\alpha$  отсчитывается по часовой стрелке от горизонтальной линии, идущей вправо. Для более наглядной демонстрации рассматриваемого эффекта будем считать поток “мюонов” постоянным и монохроматическим.

Как уже говорилось, степень поглощения  $D$  будем считать пропорциональной степени почернения  $G$ :  $D = aG$ . Для основной части объекта выбрана степень яркости  $V_I = 115$ , для чёрной  $V_{II} = 5$  и для светлой  $V_{III} = 220$ . Область вне объекта имеет  $V = 255$  (отсутствие поглощения).

Будем считать полное ослабление потока мюонов на пути каждого луча внутри объекта равным сумме степеней поглощения на каждом пикселе изображения луча мюона. Нормировку потока будем осуществлять сравнением с потоком в случае отсутствия поглощения. Тогда полный поток  $I$  от луча, дошедший до детектора и зарегистрированный им, будет равен величине

$$I = N(\alpha) \cdot 255 - a \sum_{j=1}^N G_j^j, \quad (1)$$

где суммирование ведётся по пикселям на луче мюонов внутри облучаемого объекта, количество которых равно  $N(\alpha)$ ;  $i = I, II, III$ .

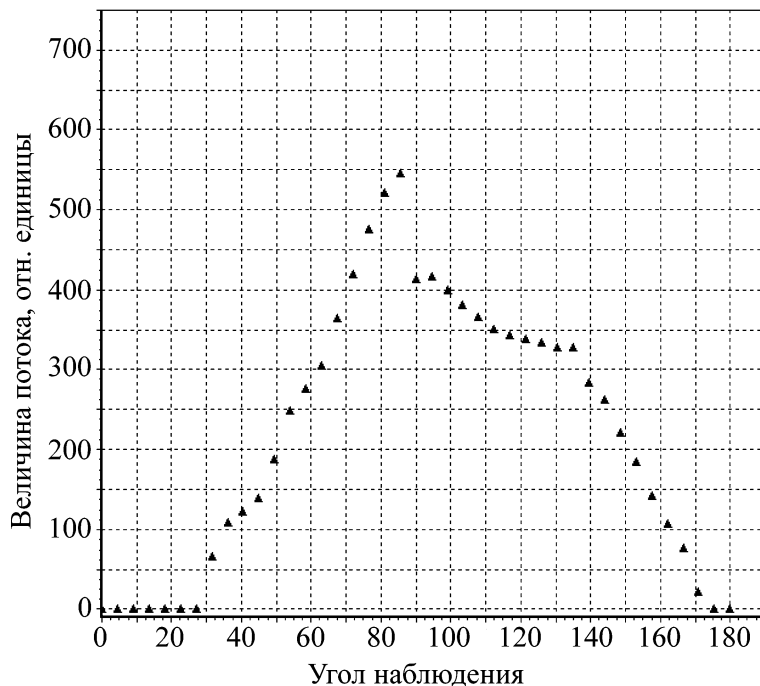


Рис. 2: Распределение потока мюонов, зарегистрированного детектором, как функция угла прихода в детектор.

Примем для простоты  $a = 1$  и посчитаем степень ослабления потока частиц (второе слагаемое правой части формулы (1)) на каждом луче, прошедшем через исследуемый объект. На рис. 2 показан результат такого “измерения”, полученный указанным выше способом. Видна довольно нерегулярная структура зависимости ослабления зарегистрированного потока от угла наблюдения. Хотя в основном объекте имеются довольно крупные массивные включения, от них появились лишь слабые неровности, которые не всегда различимы на нерегулярностях кривой в целом. Причина этого во влиянии формы облучаемого объекта на величины прошедшего потока. В результате имеет место наложение эффектов поглощения от более или менее плотных частей и эффектов различия в длинах пути, пройденного внутри объекта, также приводящих к различию в потоке.

Чтобы устранить влияние последнего, учтём длину пути, пройденного каждым мюоном внутри объекта, и посчитаем величины, приведённые к длине. Для этого, вообще говоря, необходимо знание его контура, т. е. математическая модель поверхности изу-

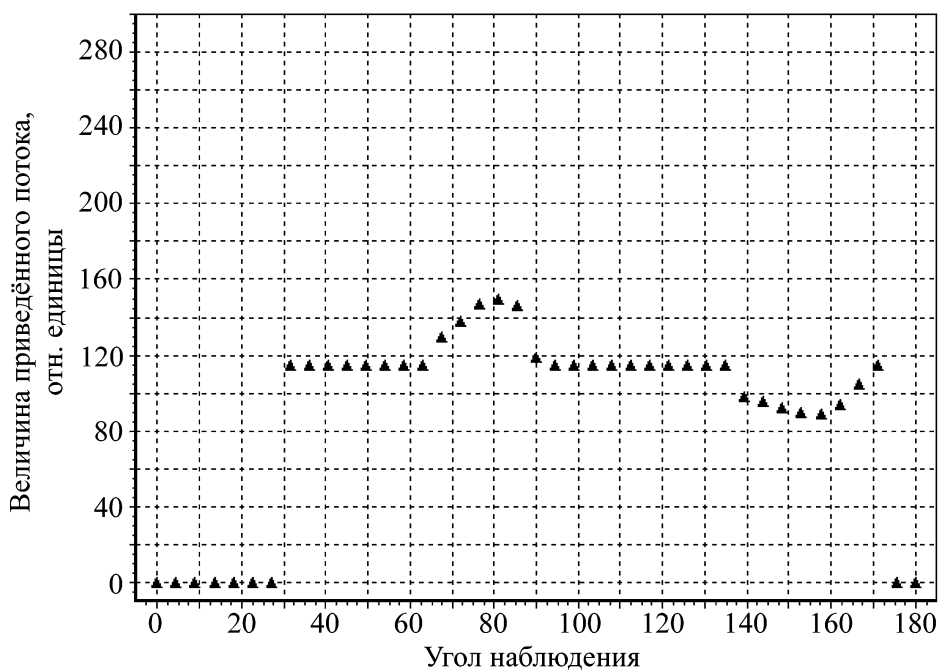


Рис. 3: Распределение приведённого потока мюонов, зарегистрированного детектором, как функция угла прихода в детектор.

чаемого объекта. В нашем случае в процессе суммирования по лучу факт нахождения внутри объекта определяется просто по степени почернения пикселей, которая не должна быть равна 255 (область вне объекта). Если теперь поделить зарегистрированный поток на соответствующую длину (в нашем случае это  $N$  для каждого луча), получим оценку средней плотности поглощения (примерно пропорциональной средней плотности) на данном направлении. Результат такой операции приведен на рис. 3. Видно, что эффекты, связанные с формой объекта полностью устранены и положение двух посторонних включений определяется достаточно точно, как выпуклость и впадина.

Проведём теперь ещё одно усовершенствование и добавим второй детектор, образуя что-то похожее на простейшую томографию. На рис. 4 показана схема облучения двух детекторов 1 и 2, а на рис. 5 – результат детектирования ими приведённых потоков мюонов с учетом длин, проходимых мюонами внутри объекта. Углы лучей второго детектора отсчитываются по часовой стрелке от идущей вниз вертикали. Светлыми квадратами на рис. 4 отмечены точки пересечения лучей, попадающих в разные детекторы.

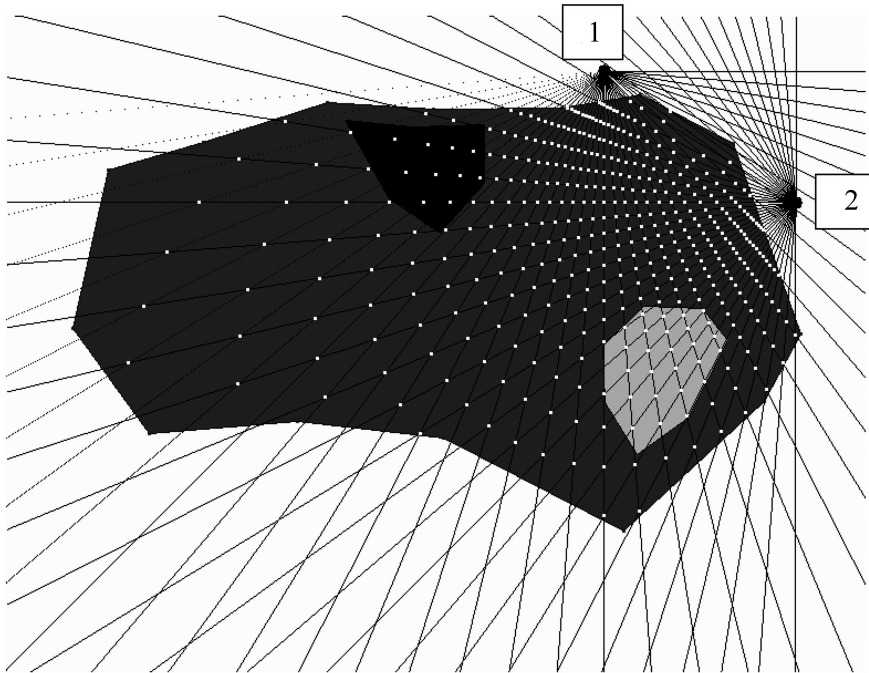


Рис. 4: Схема установки с двумя детекторами 1 и 2. Светлые точки – пересечения лучей мюонов, зарегистрированных разными детекторами.

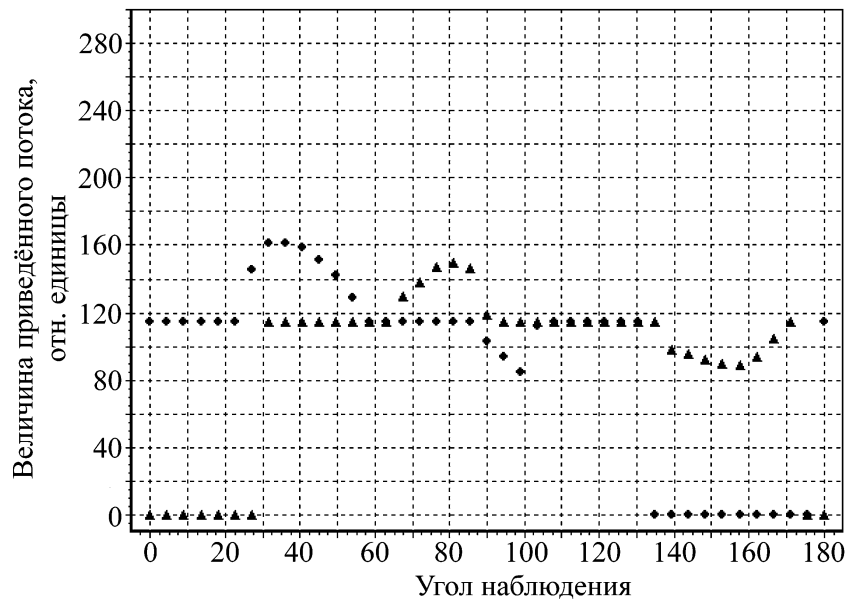


Рис. 5: Распределение приведённых потоков мюонов, зарегистрированных детекторами, как функция углов; ▲ – детектор 1, ● – детектор 2.

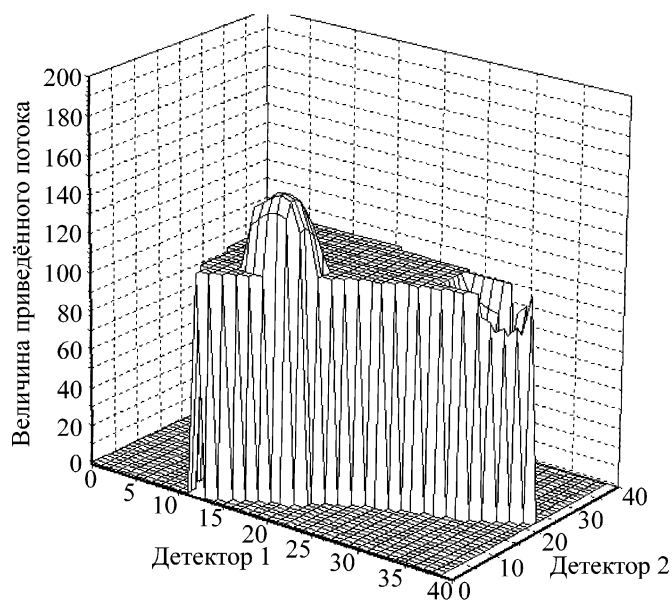


Рис. 6: Трёхмерное представление распределения плотности внутри протяжённого объекта, как функция углов. Единица на шкалах углов соответствует четырём угловым градусам.

Угловые сектора, отмечающие положение включений с другой плотностью по сравнению с основным материалом, приблизительно очерчивают их угловые области расположения. Область пересечения таких секторов от двух детекторов с некоторой степенью точности показывает область расположения включений на плоскости. Величина степени поглощения в этой области может быть оценена как среднее отличие потока, зарегистрированного двумя детекторами, от потока с других направлений. В нашем модельном случае такое усреднение даёт оценку степени поглощения для мест пересечения лучей, отмеченных на рис. 4 светлыми точками. Результат подобных манипуляций показан на рис. 6, на котором показан рельеф “плотности материала” внутри облучаемого объекта как функция углов, под которыми в детекторы пришли мюоны. Видно, что в нашем простом идеализированном эксперименте положения искомых областей выделяются достаточно чётко.

Выше был рассмотрен плоский случай, который легко может быть распространён на трёхмерный объект. В этом случае плоскость на рис. 1 может рассматриваться как срез трёхмерного объекта под определённым углом к нему, а аналогом сектора в этом случае будет телесный угол. Но в любом случае использование приведённых величин потребует наличия достаточно точной трёхмерной модели поверхности облучаемого объекта и

точной пространственной привязки детекторов, а также алгоритмов поиска точек входа и выхода мюонов для определения длины путей, проходимых ими в объекте.

В реальных экспериментах, естественно, условия проведения будут существенно отличаться от идеальных. А именно:

1. Спектр мюонов не монохроматичен и степень поглощения зависит от энергии. Это вносит некоторую неопределённость при оценке плотности участков объекта. Для устранения такой неоднозначности обычно учитывают мюоны с импульсом выше 300 МэВ, у которых зависимость поглощения от энергии не так велика, как при меньших энергиях.

2. Плотность основной части облучаемого объекта обычно неоднородна, что может приводить к замазыванию различия в потоках от различных его частей.

3. При распространении в среде мюоны перерассеиваются и меняют своё направление движения. Поскольку степень поглощения проводится путём сравнения с первоначальным потоком мюонов, который зависит от угловых координат, может быть введена ошибка, связанная с неправильным определением исходного направления.

4. В нашей имитационной модели различие в “плотности” участков для наглядности было выбрано довольно большим. У реальных объектов оно значительно меньше, соответственно масштаб в разнице потоков должен быть меньше.

5. Соотношение размеров и изучаемых частей основного объекта внутри него в реальных экспериментах намного меньше и, соответственно, меньшим будет эффект. Возможно, в этом случае придётся пользоваться сложными математическими методами, применяемыми в медицинской томографии [3].

Приведённые выше особенности реальных экспериментов могут замазать чёткую картину распределения плотности, полученную в рассмотренной модели. Тем не менее, измерение приведённых потоков в какой-то мере позволяет устранить эффекты, вносимые формой объекта, и более точно по сравнению с полным потоком выявить участки с различной плотностью.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] H. K. M. Tanaka et al., *Geophysical Research Letters* **36**, L17302 (2009).
- [2] C. Carloganu et al., *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* **2**, 55 (2013).
- [3] “The Physics of Medical Imaging”, ed. by S. Webb (Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1988).

Поступила в редакцию 4 декабря 2013 г.