

С 344.10

Г-611

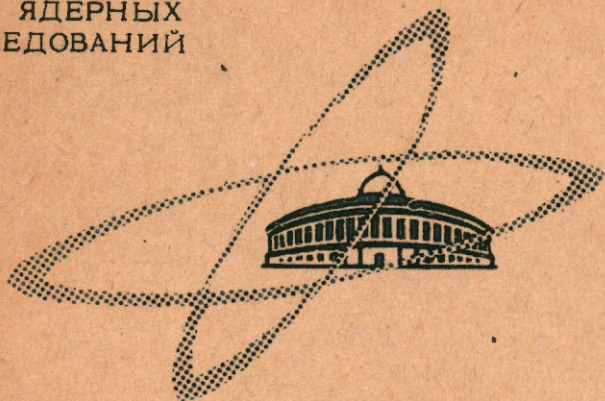
3/УИ-15

ЛБЭ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2187



Б.М. Головин, Л.А. Кулюкина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ОПОЗНАНИЯ ОБРАЗОВ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

2187

3707/5 чф

Б.М. Головин, Л.А. Кулюкина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ОПЗНАНИЯ ОБРАЗОВ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Направлено в журнал "Космические исследования"

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

ЧАСТЬ 1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗАРЯДА. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Введение

При изучении ядерных процессов нередко возникает необходимость идентифицировать электрический заряд или массу регистрируемой частицы.

Знак электрического заряда обычно определяют, наблюдая отклонение частицы в электрическом или магнитном поле.

Величина заряда (далее просто "заряд") короткопробежной частицы, как и ее масса, может быть определена на основе измерения ее энергии и ионизирующей способности. Однако при анализе длинопробежных частиц применение этого метода встречается со значительными трудностями.

В настоящей работе, которая является первой из цикла исследований по безмагнитной идентификации частиц, рассмотрены возможности определения заряда частицы высокой энергии по создаваемой ею ионизации в одном или нескольких детекторах и перспективы использования для анализа таких экспериментальных данных методов автоматического опознавания образа.

2. Ионизационные потери тяжелых заряженных частиц в тонких слоях вещества. Формулировка задачи

Наиболее вероятная величина ионизационных потерь ^{1/1} при прохождении частицы с зарядом ze , массой (много большей массы электрона) M , кинетической энергией T_0 через слой x (г/см^2) вещества с массовым числом A и зарядом Z_e может быть найдена по формуле

$$\Delta E_{\text{вер}} = \frac{2C\pi e^2 x z^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{4C(\pi e^2)^2 x^2}{\beta^2} - \beta^2 + j \right]. \quad (1)$$

Здесь: m - масса электрона, I - ионизационный потенциал вещества, j - поправочный член, $C = \pi N_e \frac{Z}{A} = 0,15 \frac{Z}{A}$; r_0 - классический радиус электрона, N - число Авогадро.

Наблюдаемые на опыте ионизационные потери в тонких слоях сильно флюктуируют и могут значительно отличаться от величины, рассчитанной по формуле (1).

Теоретический анализ флюктуаций ионизационных потерь однозарядных частиц в очень тонких слоях вещества был выполнен Ландау^{/2/}. Полученные им результаты в применении к более толстым, но удовлетворяющим условию $\Delta E \ll T_0$ слоям, были обобщены, например, в работах^{/3,4,5/}.

Удобный для многих случаев полуграфический метод был предложен Симоном, основные результаты неопубликованной работы которого приведены в книге Б.Росси^{/1/}. Согласно этому методу, наиболее вероятное значение ионизационных потерь рассчитывается по формуле (1), а форма их спектра определяется значением параметра

$$G = \frac{2 C m c^2 x}{\beta^2 E_m} \quad (2)$$

$$\text{где } E_m = 2 m c^2 \cdot \frac{\beta^2}{1-\beta^2}$$

Малые значения этого параметра соответствуют резко асимметричному распределению Ландау, а его большие значения в пределе приводят к симметричному распределению гауссовского типа.

Большой флюктуационный разброс величин ионизационных потерь в тонком детекторе делает крайне ненадежным определение ионизирующей способности частицы по результатам одиночных измерений.

Значительно лучшие результаты могут быть получены при независимых измерениях ионизации в нескольких детекторах, последовательно проходимых частицей. Такой подход в применении к определению массы однозарядных частиц рассматривался в ряде работ^{/6,7/}. При этом, как правило, использовались пучки частиц, монохроматизированные магнитным полем.

Значительно сложнее дело обстоит в том случае, когда по каким-либо обстоятельствам использование магнитного поля оказывается невозможным и в исследуемом пучке присутствуют частицы с широким энергетическим спектром и различными зарядами и массами. Дело еще более усложняется при необходимости работать с неколлимированными или слабо коллимированными пучками частиц.

При проведении численных расчетов в качестве достаточно общего примера была взята задача определения зарядового спектра частиц при регистрации протонов, альфа-частиц и ядер легкой компоненты $3 \leq z \leq 5$ первичного космического излучения.

В соответствии с литературными данными предполагалось, что частицы всех типов имеют одинаковый (в расчете на один нуклон) энергетический спектр, удовлетворительно описываемый формулой^{/8/}:

$$N(\epsilon) = \frac{1 - \exp(-80\epsilon^3)}{(1+\epsilon)^{2,5}} \quad (3)$$

где $\epsilon = (\frac{T_0}{A_1})$ в Гэв/нуклон; A_1 — массовое число частицы.

Предполагалось, что вероятность $W(\theta)$ попадания на регистрирующую систему частицы, движущейся под углом θ к ее оси, пропорциональна $\cos \theta$, т.е.

$$\begin{aligned} W(\theta) &= \cos \theta & 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}, \\ W(\theta) &= 0 & \theta > \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

и не зависит от азимутального угла ϕ .

Расчет проводился применительно к использованию в качестве регистрирующей системы телескопа полупроводниковых (кремниевых) детекторов с толщиной чувствительного слоя 1,5 мм ($x = 0,38 \text{ г/см}^2$) и чувствительной площадью около 20 см^2 . Нижний энергетический порог регистрации частиц задавался толщиной фильтра, устанавливаемого между детекторами^{х)}.

3. Расчет спектра ионизационных потерь

Программа вычислений спектра ионизационных потерь при прохождении частицы через группу детекторов основывалась на идее моделирования реального физического процесса и включала следующие основные операции.

1. Случайный выбор заряда частицы в соответствии с заданными относительными вероятностями появления частиц разных типов.
2. Случайный выбор длины пути частицы в детекторе в соответствии с заданным угловым распределением потока регистрируемых частиц,
3. Случайный выбор энергии частицы в соответствии с заданным энергетическим спектром регистрируемых частиц.
4. Расчет наиболее вероятного значения ионизационных потерь для частицы с выбранными значениями z , x , T_0/A_1 .
5. Расчет параметра G , определяющего форму спектра ионизационных потерь для данной частицы.
6. Случайный выбор истинной величины ионизационных потерь в соответствии с формой спектра, определяемой параметром G .

х) Это относится к порогу $T_0/A_1 = 015$ Гэв/нуклон. При изучении доли энергетического порога конкретный способ его задания не рассматривался.

7. Определение энергии частицы после прохождения ее через детектор.

8. Цикл по расположенным до фильтра детекторам и определению значений ионизационных потерь в каждом из них.

9. Потеря энергии в фильтре.

10. Цикл по детекторам, расположенным за фильтром, и определение истинных ионизационных потерь в каждом из них.

11. Выдача результатов расчета (печать или перфорация).

Были разработаны модификации программы, позволяющие при проведении расчетов фиксировать одну из величин z , x , T/A_1 , импульсы частицы PC , $(T/A_1)_{\max}$, $(T/A_1)_{\min}$ или их комбинацию. Программа допускает также вариации числа и размеров детекторов, расположенных до и после фильтра.

В качестве примера на рис. 1 приведены рассчитанные по этому методу распределения ионизационных потерь энергии частицами с $z = 1-5$ с фиксированной энергией $T/A_1 = 2$ Гэв/нуклонов в слое $X = 0,38$ г/см² кремния. На рис. 2 даются ионизационные потери частиц с теми же зарядами, но с энергетическим спектром (3).

Моделирование энерговыделения частиц с различными зарядами было использовано при проверке возможности использовать для идентификации заряда частицы методы автоматического опознавания образов.

4. Автоматическое опознавание образа (основные положения)

За последние годы появился целый ряд работ, посвященных созданию программ обучения ЭВМ распознаванию образов. Программа опознавания характеризуется следующими основными чертами /8/.

1. Никакие сведения о подлежащих различению конкретных объектах в машину заранее не вводятся.

2. В ходе обучения машине предъявляется некоторое количество объектов каждого из подлежащих определению классов и сообщается, к какому классу принадлежит каждый объект.

3. Машина в соответствии с заданной программой обрабатывает полученную информацию.

4. В результате обработки информации машина с достаточной надежностью различает сколь угодно большое количество ранее ей не предъявлявшихся объектов каждого класса.

Наибольшей наглядностью обладает геометрическая интерпретация поставленной задачи. В этом случае признаки данного объекта считаем некоторыми количественно измеримыми величинами и значения их будем откладывать на осях координат пространства образов. Тогда совокупность признаков множества объектов, принадлежащих некоторому классу, образует геометрическое место точек, которое и характеризует обобщенный образ данного класса. Точки (признаки), характеризующие объекты другого класса, будут, вообще говоря, занимать иное положение в пространстве образов. Опознавание принадлежности неизвестного объекта к тому или иному классу можно рассматривать, как определение близости характеризующей его точки в пространстве признаков к геометрическому месту точек, характеризующих этот класс.

В настоящее время предложен ряд вариантов автоматического опознавания образов. Кратко остановимся лишь на двух из них.

а) Метод потенциальных функций

Одним из простейших методов опознавания образов является метод, основанный на использовании потенциальных функций /10/. Согласно этому методу, характеристической точке каждого из использованных для обучения объектов приписывается некоторая функция ("потенциал"), максимальная в этой точке и убывающая при удалении от нее по всем направлениям (т.е. характеристическая точка рассматривается как источник некоторого поля). В простейшем случае такой функцией может быть, например,

$$\phi(R) = \frac{1}{1 + \alpha R^2}, \quad (5)$$

где α — коэффициент, определяющий скорость убывания потенциала; R — "расстояние" между точкой — источником и точкой, в которой определяется значение создаваемого ею потенциала. В качестве R может быть взято, например, евклидово расстояние, или расстояние по Хеммингу (число несовпадающих разрядов в кодах сравниваемых точек).

Таким образом при обучении в пространстве образов имеем N_β — характеристических точек объектов класса β . Создаваемый этими источниками средний потенциал в точке наблюдения y будем называть потенциалом обобщенного образа класса β в этой точке. Такой потенциал может быть рассчитан по формуле

$$\Phi_\beta(y) = \frac{1}{N_\beta} \sum_{i=1}^{N_\beta} \phi[R(x_i^\beta, y)], \quad (6)$$

где x_i^β — характеристические точки объектов класса β , заданные при обучении; β — номер класса объектов.

В силу гипотезы о компактности образов /8/ функция (6) принимает максимальное значение над областью пространства признаков, соответствующей "своему" классу и

убывает при удалении от нее. Поэтому при опознании неизвестного объекта естественно относить его к тому классу, потенциал которого принимает в данной точке наибольшее значение.

Описанный алгоритм дает высокую надежность распознавания в том случае, когда точки-источники равномерно заполняют области пространства признаков, принадлежащие каждому из распознаваемых классов.

Для случая неравномерного заполнения характеристическими точками соответствующих областей пространства был предложен^{/10/} улучшенный вариант описанного алгоритма. Он основан на том, что каждой точке-источнику приписывается некоторый весовой множитель, играющий роль "мощности источника". Увеличивая вес точек, лежащих в слабо заполненной области пространства, принадлежащей данному классу, можно значительно увеличить надежность опознания объектов.

Потенциал обобщенного образа класса объектов в этом случае вычисляется по формуле

$$\Phi_{\beta}(y) = \frac{1}{N_{\beta}} \sum_{i=1}^{N_{\beta}} \lambda_i^{\beta} \phi [R(x_i^{\beta}, y)], \quad (7)$$

где λ_i^{β} - мощность i -источника класса β .

Процесс обучения сводится к тому, что предъявленные для обучения точки вначале используются для создания обобщенного образа (при этом полагают, что все $\lambda_i^{\beta} = 1$), а затем производится опознание каждой из них. Если при опознании и имеет место ошибка, то вклад соответствующей точки в потенциал своего образа увеличивается. Этот процесс повторяется до тех пор, пока все предъявленные для обучения точки не будут опознаваться без ошибок.

По завершении обучения в памяти машины хранятся предъявленные для обучения характеристические точки с указанием образа, к которому они принадлежат и накопленные в процессе обучения числа x_i .

б) Метод разделения пространства образов

Более сложным, но в некоторых отношениях более перспективным, является опознание объекта, основанное на линейном разделении пространства образов.

Рассмотрим кратко основные положения этого метода^{/11/}.

Пусть имеем две характеристических точки, первая из которых принадлежит объекту класса А, а вторая - объекту класса В. Между точками можно провести некоторую границу раздела и объекты, характеристические точки которых попадают в то же пространство, что и точка 1, относить к классу А и наоборот. Однако использованке для

обучения лишь двух точек приводит к очень большой неопределенности в выборе положения границы раздела и к связанной с этим малой надежности опознания объектов.

Используем для обучения еще одну точку (точка 3), принадлежащую, например, классу А. Если эта точка попадет в одно полупространство с точкой 1, то граница раздела может сохранять свое прежнее положение. Если же точка 3 попадает в полупространство точки 2, то это свидетельствует о неудачном выборе положения границы раздела и его следует изменить.

Повторяя обучение с достаточно большим числом точек каждого класса, можно с достаточной точностью определить границы между областями пространства признаков, занимаемых каждым классом. Принадлежность опознаваемого объекта в этом случае определяется по тому, в какую область пространства признаков ложится его характеристическая точка.

Важной особенностью этого метода является случайность выбора границ раздела между классами. Благодаря такой случайности при повторном обучении на одном и том же материале границы областей получаются несколько различными и при опознании объектов ошибки машины будут неодинаковыми. Окончательное суждение о принадлежности объекта в этом случае можно выводить на основании "голосования", т.е. относить объект к тому классу, к которому его относил большинство использованных для опознания вариантов обучения.

Более подробно этот алгоритм и полученные с его помощью результаты будут описаны в одной из следующих работ этого цикла.

5. Автоматическое опознание образа (расчеты)

В рассматриваемом случае частица, прошедшая через регистрирующую систему, характеризуется несколькими амплитудами V_i , $i = 1, 2, 3 \dots n$, где n - число счетчиков в регистрируемой системе^{х)}.

Признаком x_i данной частицы назовем некоторую функцию от V_i . Каждая частица будет характеризоваться совокупностью нескольких таких признаков.

Совокупность признаков множества частиц данного класса образует обобщенный образ этого класса.

Перейдем к описанию использованной нами программы опознания частиц на ЭВМ.

х) Большая часть вычислений выполнена для $n = 4$.

Для построения обобщенного образа использован улучшенный алгоритм потенциала. Блок-схема программы приведена на рис. 3. Некоторые ее характеристики приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Некоторые характеристики программы автоматического опознавания

Подпрограмма №	Длина подпрограммы (№ 8 ячеек)	Время работы подпрограммы	Примечание
1	200	5 сек/объект	
2	200	8-10 мин	Указано время работы при $N_{\beta}=70$ и семи опознаваемых классах
3	270	20 сек/объект	
4	270	20 сек/объект	

Введем обозначения: z - номер класса частиц (заряд ее в единицах заряда электрона), N_{β} - число точек обучения, N_1 - число точек проверки.

Оперативная память машины позволяет в случае, если каждый объект характеризуется 5 признаками и число классов равно 7, использовать до 70 точек обучения в каждом классе.

На первом этапе решения рассматриваемой задачи в качестве признаков частицы использовались следующие функции амплитуд V_i :

Вариант 1.

$$x_1^{(I)} = a_1 a_2 \dots a_n b_1 b_2 \dots b_n c_1 c_2 \dots c_n, \quad V_i = a_i \cdot 10^2 + b_i \cdot 10 + c_i$$

$$x_2^{(I)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$$

$$x_3^{(I)} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} V_i; \quad \Sigma' \text{ суммирование по всем амплитудам, кроме наибольшей.}$$

$$x_4^{(I)} = V_{\max} - V_{\min}$$

$$x_5^{(I)} = V_n - V_1$$

Вариант 2.

$$x_1^{(II)} = x_1^{(I)}$$

$$x_2^{(II)} = x_2^{(I)}$$

$$x_3^{(II)} = x_3^{(I)}$$

$$x_4^{(II)} = \frac{1}{x_3} (V_{\max} - V_{\min})$$

$$x_5^{(II)} = x_5^{(I)}$$

Вариант 3.

$$x_1^{(III)} = x_1^{(I)}$$

$$x_2^{(III)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln V_i$$

$$x_3^{(III)} = x_3^{(I)}$$

$$x_4^{(III)} = x_4^{(I)}$$

$$x_5^{(III)} = x_5^{(I)}$$

Расчеты, выполненные с этими системами признаков показали, что использование выбранного метода позволяет идентифицировать заряды частиц с надежностью 50-80%. Несколько лучшие результаты получались с третьим вариантом признаков и было установлено, что значительная часть случаев неправильного опознавания связана с тем, что некоторые, сравнительно редко встречающиеся, амплитуды V_i значительно превышают значения, характеризующие основную часть частиц данного класса. Основную роль такие амплитуды играют в формировании признаков $x_1, x_2^{(I)}, x_4^{(I)}$.

Для уменьшения роли таких выскакивающих значений V_i была выбрана новая система признаков.

Вариант 4.

$$x_1^{(IV)} = V_{\min}$$

$$x_2^{(IV)} = x_3^{(I)}$$

$$x_3^{(IV)} = x_2^{(III)}$$

$$x_4^{(IV)} = x_5^{(IV)} = 0$$

Применение этого варианта привело к увеличению надежности опознавания частиц, и с ним был выполнен ряд дополнительных исследований метода.

1. Надежность опознавания была определена при различных числах точек обучения N_{β} . Полученные для разных z зависимости приведены на рис. 4.

2. Исследована зависимость надежности опознавания от выбора точек обучения. Для этого из общего количества (140 точек) брались различные случайные выборки по $N_{\beta} = 70$. Результаты вычислений свидетельствуют о том, что при $N_{\beta} = 70$ надежность опознавания от выбора точек обучения не зависит.

3. Изучено влияние на надежность опознавания частиц энергетического порога регистрирующей системы. Вычисления проводились для порогов $(\frac{T_0}{A})_{\min} = 0,15; 0,50; 1,00$ Гэв/нуклон.

Результаты этих вычислений приведены на рис. 5.

6. Выводы

1. Подготовлена и испытана программа, моделирующая ионизационные потери тяжелых заряженных частиц, проходящих через телескоп из нескольких детекторов с фильтром, для задания энергетического порога установки.

2. Рассмотрена возможность идентификации заряда частицы по ее ионизационным потерям в нескольких детекторах и предложено использовать для обработки таких данных методы автоматического опознавания образов на ЭВМ.

3. Пробная идентификация зарядов частиц проведена на основе одного из простейших алгоритмов - использования потенциальных функций.

4. Результаты вычислений показали возможность идентификации зарядов частиц с зарядами $1 < z < 5$ и энергетическим спектром (2) с надежностью 87-98% при энергетическом пороге установки $(\frac{T_0}{A})_{\min} = 0,15$ Гэв/нуклон и с надежностью 87-100% при пороге $(\frac{T_0}{A})_{\min} = 1$ Гэв/нуклон.

Использование в описанном алгоритме идентификации заряда частиц других потенциалов и более детальный анализ полученных результатов является содержанием следующей части предлагаемого цикла работ.

Авторы благодарят В.П.Джелепова и Г.А.Осокова за постоянный интерес к работе и обсуждение ряда затронутых в ней вопросов.

Л и т е р а т у р а

1. Б.Росси. "Частицы больших энергий". ИЛ, Москва, 1955.
2. Л.Д.Ландау. Journ. of Phys. (СССР) 8, 201 (1944).
3. П.В.Вавилов. ЖЭТФ, 32, 920, (1957).
4. U.Fano. Ann. Rev. Nucl. Science, 13, 1 (1963).
5. O.Blank, S.Leisegang. Zs. f. Phys., 128, 500 (1950).
6. Ю.К.Акимов, В.И.Комаров, О.В.Савченко, Л.М.Сороко. Преприят ОИЯИ Р-380, Дубна 1959.
7. A.I.Alikhanov, V.A.Lubimov, G.P.Eliseiev. CERN Symposium, 1956, v. 2, p. 87.
8. Д.Эване. "Труды международной конференции по космическим лучам". Москва, июль 1959, т. 3, стр. 104.
9. А.Г.Аркадьев, Э.М.Браверман. "Обучение машины распознаванию образов". Москва 1964.
10. О.А.Башкиров, Э.М.Браверман, И.Б.Мучник. Автоматика и телемеханика, 25, 692, 1964.
11. Э.М.Браверман. Автоматика и телемеханика, 23, 349, 1962.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 мая 1965 г.

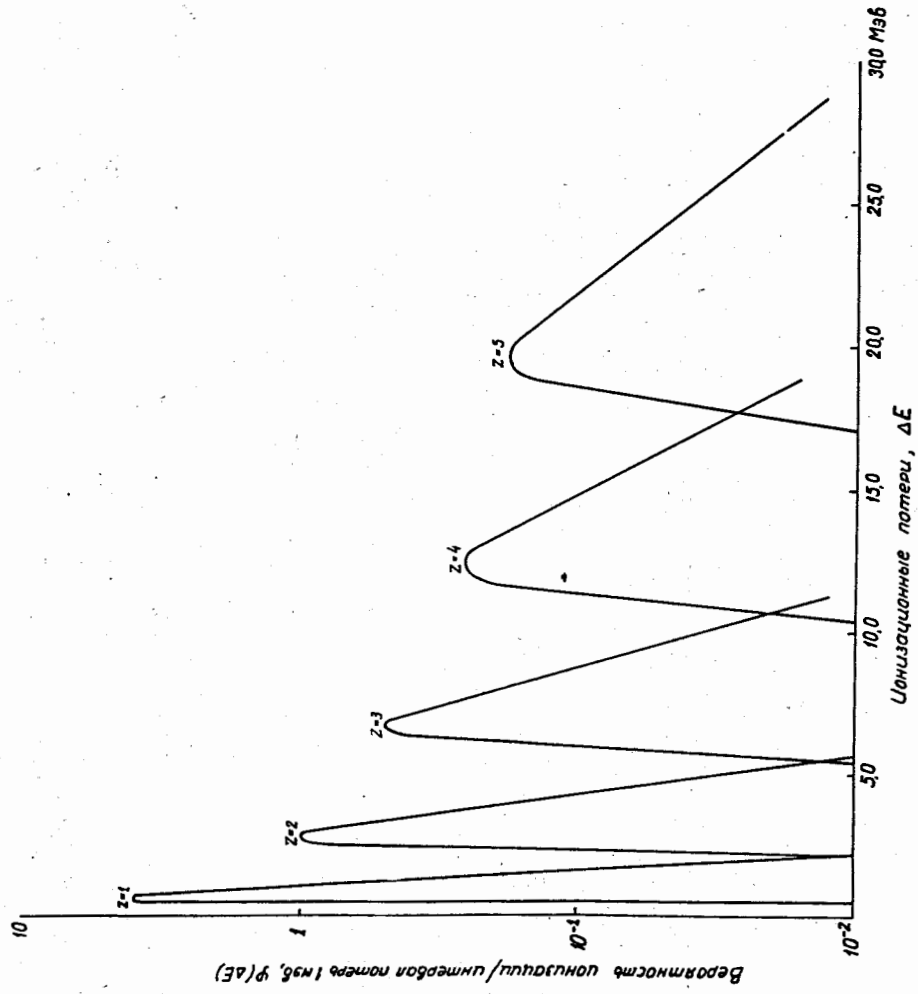


Рис. 1. Спектры ионизационных потерь частиц с $1 \leq z \leq 5$ и $(T_0/A) = 2,0$ Гэв/нуклон в слое кремния $X=0,98$ г/см².

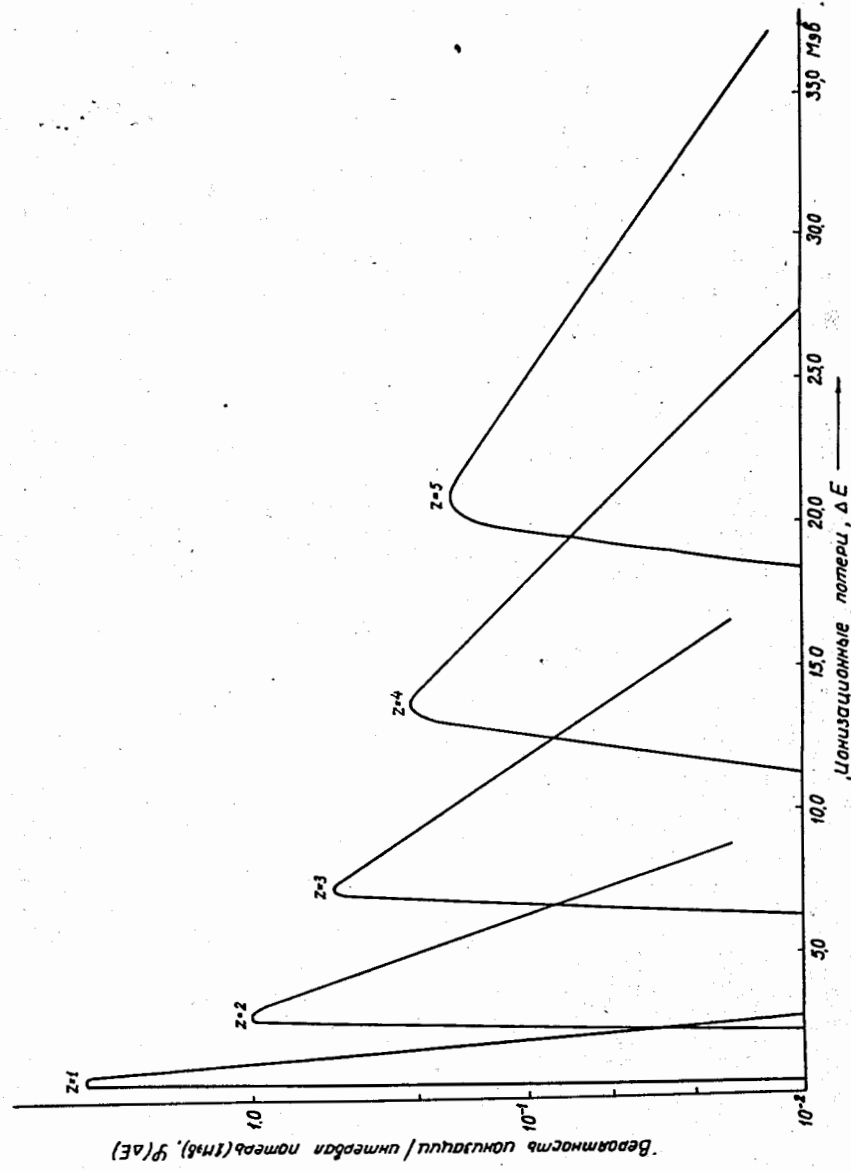


Рис. 2. Спектры ионизационных потерь частиц с $1 \leq z \leq 5$ и энергетическим распределением (3) в слое кремния $X=0,98$ г/см².

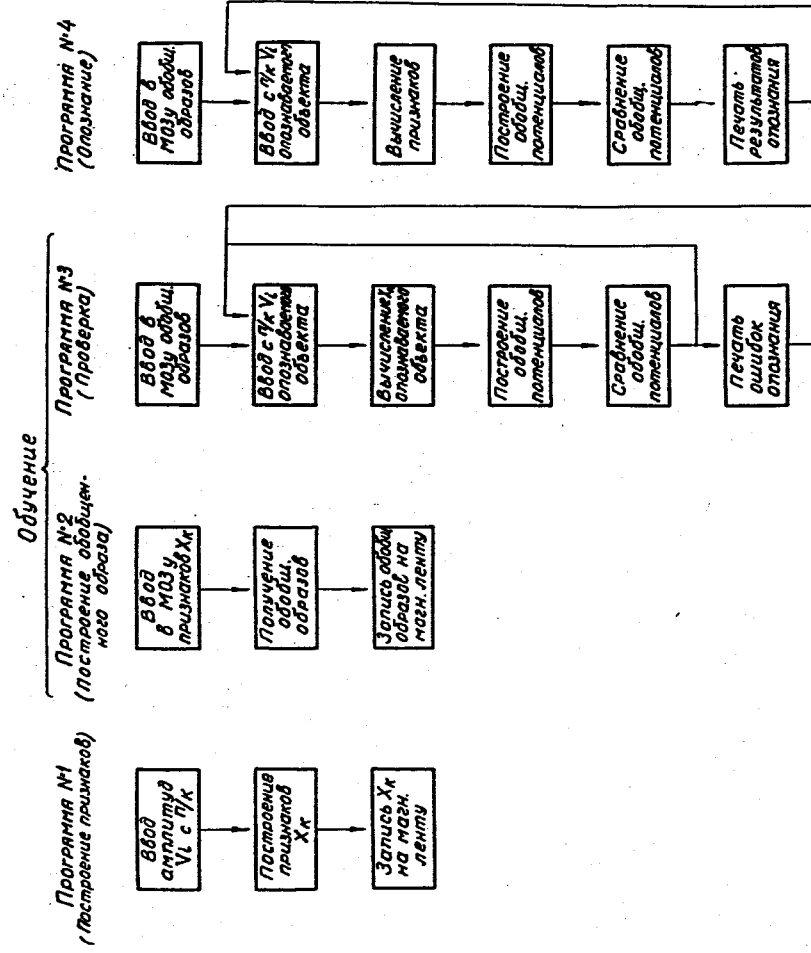


Рис. 3. Блок-схема программы обучения и опознавания.

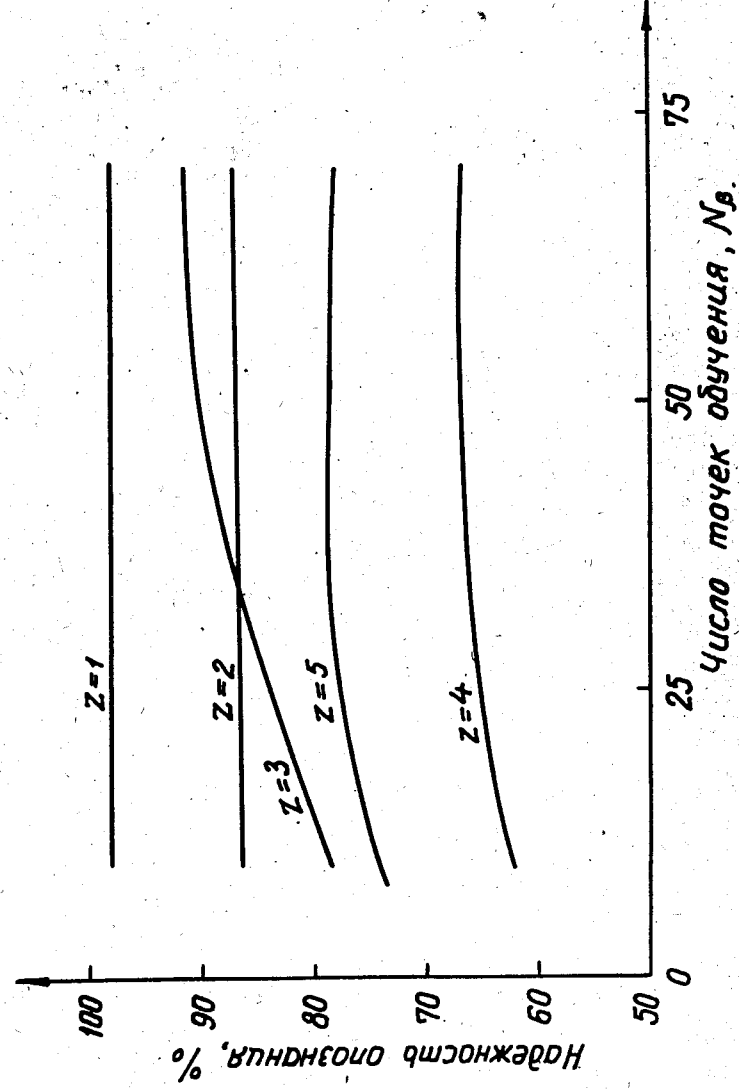


Рис. 4. Зависимость надежности опознавания от числа точек обучения.