

### 3.6. Сейсмические приборы

Основой большинства сейсмических приборов является наличие инертной массы, которая способна сохранять в течение некоторого времени свое положение в пространстве при перемещениях окружающей среды.

Широко распространенным элементом измерительной части приборов является маятник  $M$ , для повышения чувствительности уравновешенный пружиной, при помощи которой он возвращается в исходное положение после отклонения из состояния равновесия. Примеры схем таких элементов приведены на рис.3.3.

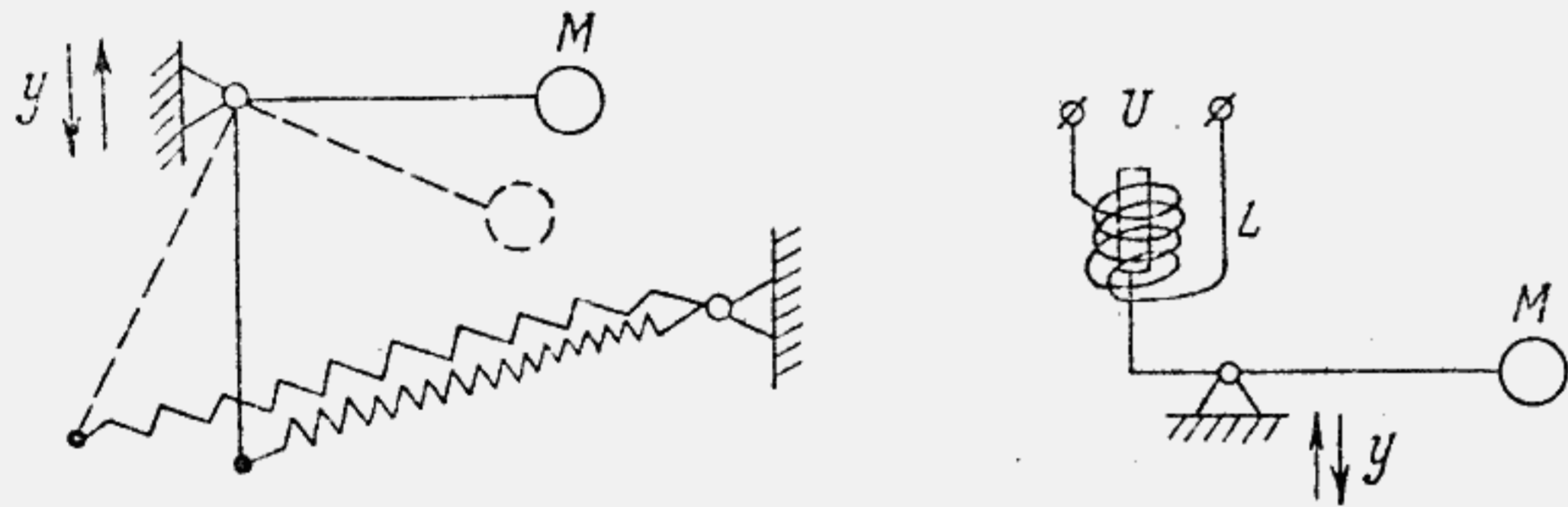


Рис.3.3

#### Емкостной акселерометр с частотной модуляцией

Чувствительным элементом акселерометра служит плоская диафрагма, являющаяся подвижным электродом дифференциального конденсатора  $C$  (рис.3.4). При воздействии на корпус прибора ускорения, перпендикулярного плоскости диафрагмы, происходит ее прогиб, в результате чего емкость одной секции дифференциального конденсатора увеличивается, а другой — уменьшается. Каждая секция включена в схему своего высокочастотного генератора 1 и 2. Прогиб диафрагмы вызывает уменьшение частоты одного генератора и увеличение другого. Сигналы с частотами  $f_1$  и  $f_2$  поступают на смеситель, на выходе которого стоит фильтр нижних частот (ФНЧ), выделяющий разностную частоту

$$F = f_2 - f_1 = (f_{02} + \Delta f_2) - (f_{01} - \Delta f_1) = (f_{02} - f_{01}) + (\Delta f_2 + \Delta f_1) = F_0 + \Delta F,$$

где  $f_{01}$ ,  $f_{02}$  — начальные частоты генераторов;  $F_0$  — начальная разностная частота;  $\Delta f_{1,2}$ ,  $\Delta F$  — приращение частоты. Пороговая

чувствительность акселерометра определяется минимальным прогибом диафрагмы, которая вызывает изменение разностной частоты 200 Гц. Недостаток: низкое быстродействие из-за колебательного движения диафрагмы.

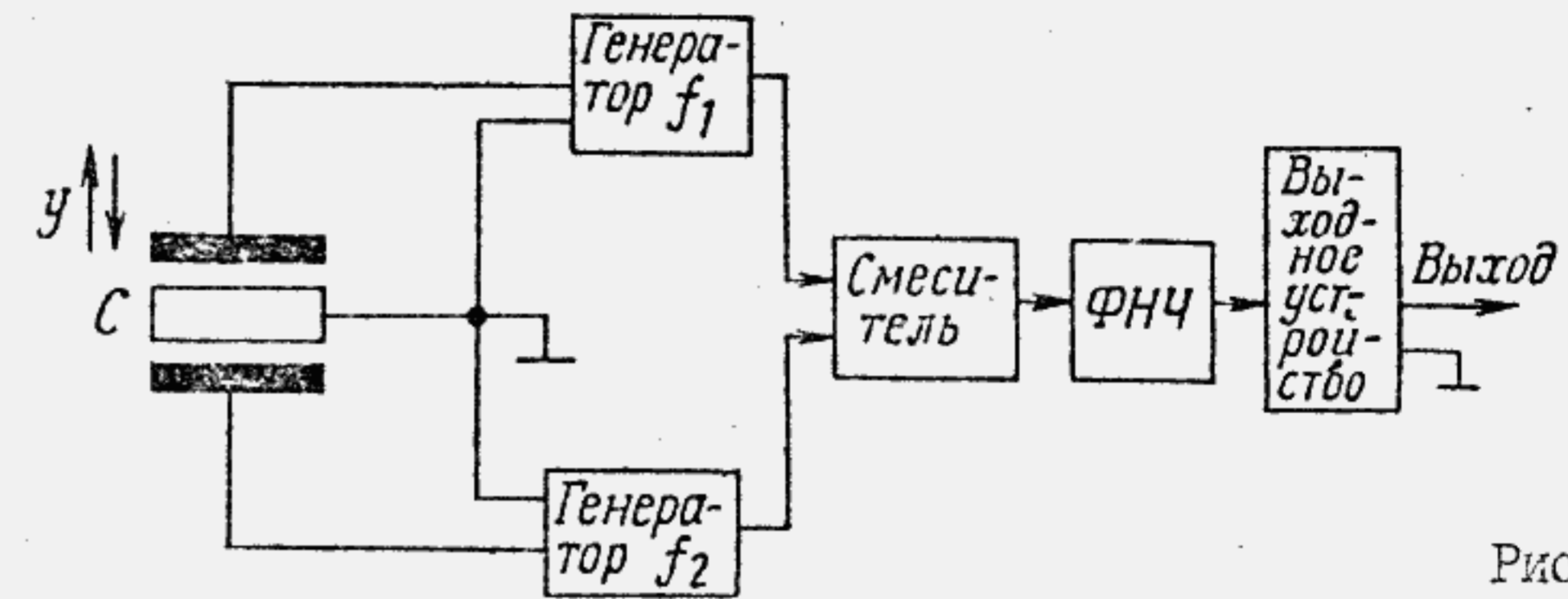


Рис.3.4

Выходное устройство служит для согласования выхода системы с кабельной линией. По указанной схеме выполнены приборы на 60, 120, 600, 1200, 6000 м/с<sup>2</sup>. Номинальному ускорению соответствует  $\Delta F = \pm 2$  кГц, диафрагма  $\varnothing = 50$  мм, диаметр неподвижных электродов 32 мм.

#### Малогабаритный сейсмический прибор с компенсацией положения чувствительного элемента

На рис.3.5 приведена принципиальная схема прибора. Емкостной дифференциальный преобразователь вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный перемещению средней пластины. Средняя пластина дифференциального конденсатора  $C_{диф}$  жестко закреплена на инертной массе ИМ. Магнитоэлектрический преобразователь  $L$  прибора используется только для образования отрицательной обратной связи и получения оптимального затухания чувствительного элемента.

Отрицательная обратная связь, обусловленная  $R_1 C_1$  цепочкой, вводит в колебательную систему повышение частоты собственных колебаний массы ИМ с 5 до 40 Гц. На выходе усилителя  $У1$  и линии 1 возникает электрический сигнал, соответствующий ускорениям грунта, на котором установлен прибор. Обратная связь уменьшает нелинейность, влияние внешних помех и аппаратных шумов. Сигнал  $U_1$ , снимаемый с выхода 1, используется для записи ускорений объектов исследования.



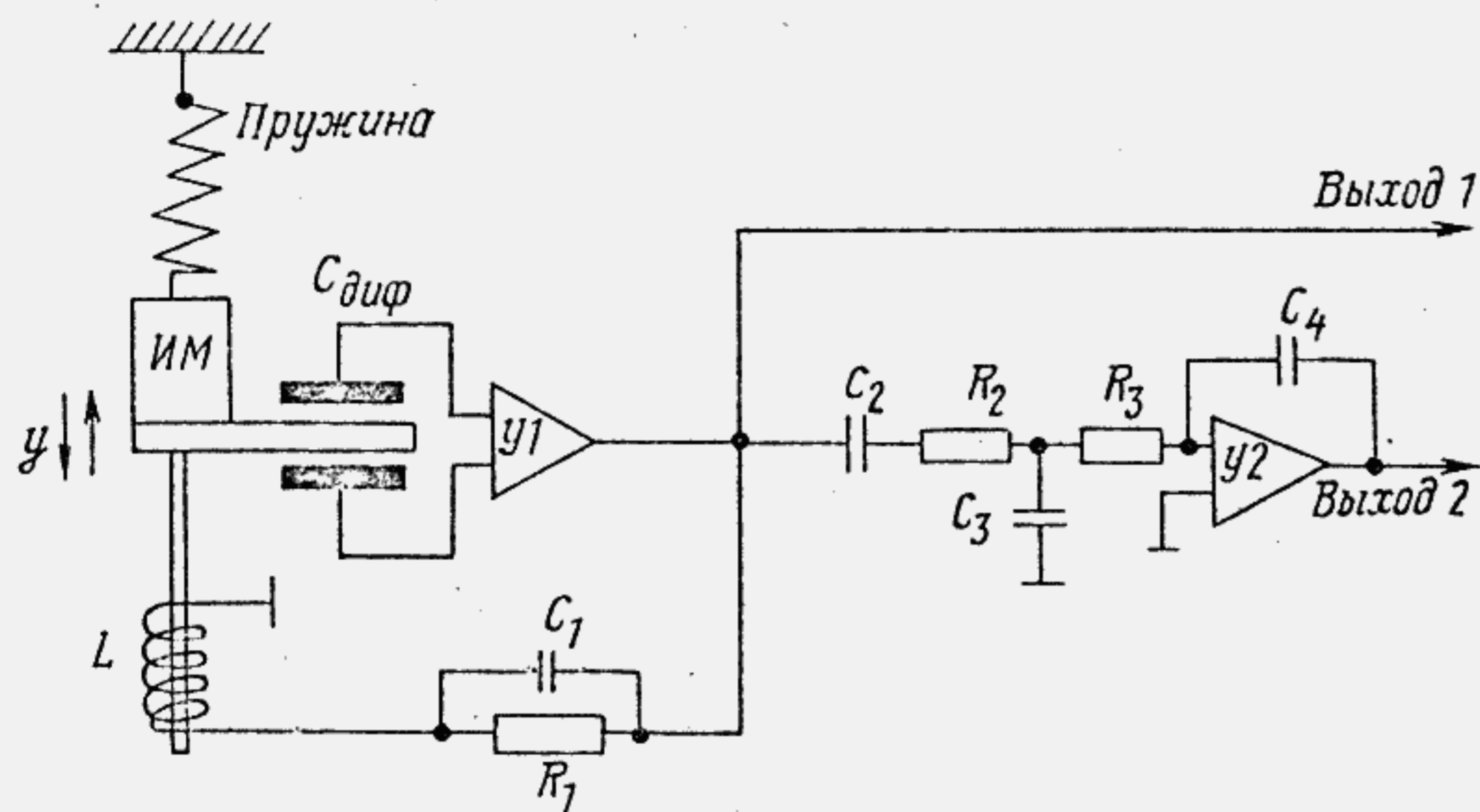


Рис.3.5

К массе ИМ сейсмометра присоединена средняя пластина дифференциального конденсатора  $C_{диф}$ . Емкости  $C_{диф}$  подключены к резонансным контурам усилителя У1. На выходе У1 образуется напряжение, пропорциональное смещению массы ИМ. Это напряжение подается в обмотку  $L$  магнитоэлектрического преобразователя через сопротивление  $R_1$  и ускоряющую емкость  $C_1$ , образуя глубокую отрицательную обратную связь в сейсмометре, компенсирующую смещение массы ИМ относительно среднего (нулевого) положения. Емкость  $C_1$  способствует ускорению затухания системы.

Выходной сигнал усилителя У1 через фильтр нижних частот  $C_2, C_3, R_2, R_3$  поступает на активный фильтр У2 и подвергается таким образом двойному интегрированию, обеспечивая регистрацию перемещений сейсмографом. Чувствительность прибора, как акселерометра, составляет  $45 \text{ В/}g$ , где  $g$  — ускорение свободного падения; в режиме сейсмографа чувствительность равна  $230 \text{ В/мм}$ .

### Трехкомпонентный пьезоэлектрический датчик ускорений с общей инертной массой

Устройство датчика приведено на рис.3.6. Из рисунка видно, что инертная масса имеет форму куба. В центре каждой из шести граней куба расположена пьезоэлектрическая пластина 2. Стрелками указано направление поляризации пластин. Инертная масса с

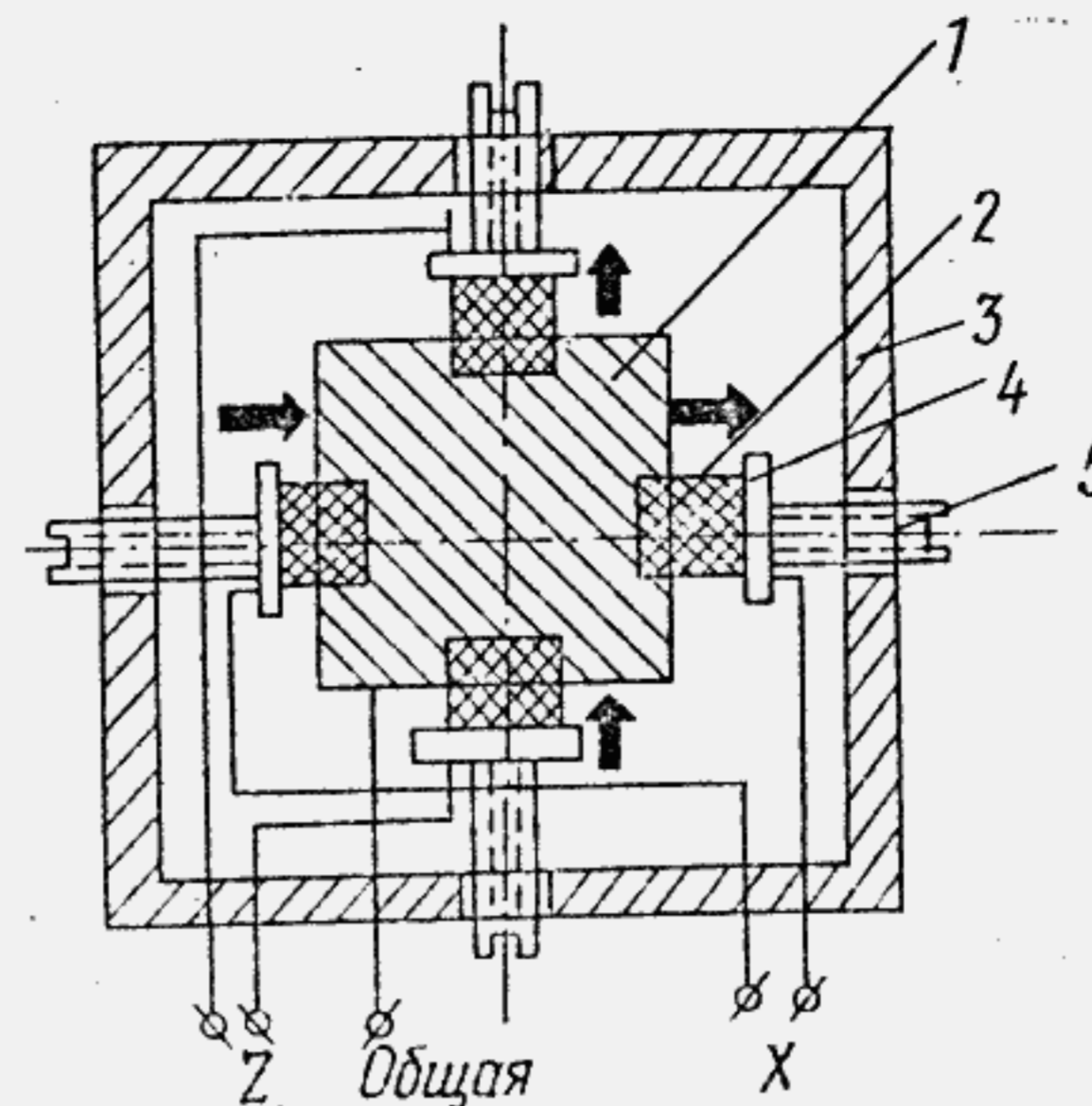


Рис.3.6

Таким образом, трехкомпонентный сейсмоакселерометр состоит из трех взаимно перпендикулярных тандем-датчиков, имеющих общую инертную массу. Такой трехкомпонентный датчик с общей инертной массой осуществляет разложение любой силы, действующей на инертную массу с ускорениями от  $10$  до  $120 \text{ см/с}^2$ , на три взаимно перпендикулярные составляющие. С выхода датчика снимаются три электрических напряжения, пропорциональные соответствующим составляющим действующей силы.

Более чувствительный датчик получен при замене зажимных винтов струнами, обеспечивая чувствительную подвеску.

### Магнитоупругий сейсмоакустический приемник

Общим для таких преобразователей является элемент из четырех отверстий, выполненных в деформируемой зоне силовоспринимающего магнитопровода, в котором по диагонали уложены измерительные намагничивающие обмотки. Схема такого элемента показана на рис.3.7.

Если через намагничивающую обмотку I пропустить переменный ток, то в магнитопроводе вокруг отверстий создастся магнитный поток. При симметричной конструкции и при условии изотропии свойств ненагруженного магнитопровода ЭДС в измерительной обмотке 2 не наведется. Под воздействием внешней силы  $F$  происходит изменение магнитных свойств материала магнитопровода. Магнитная



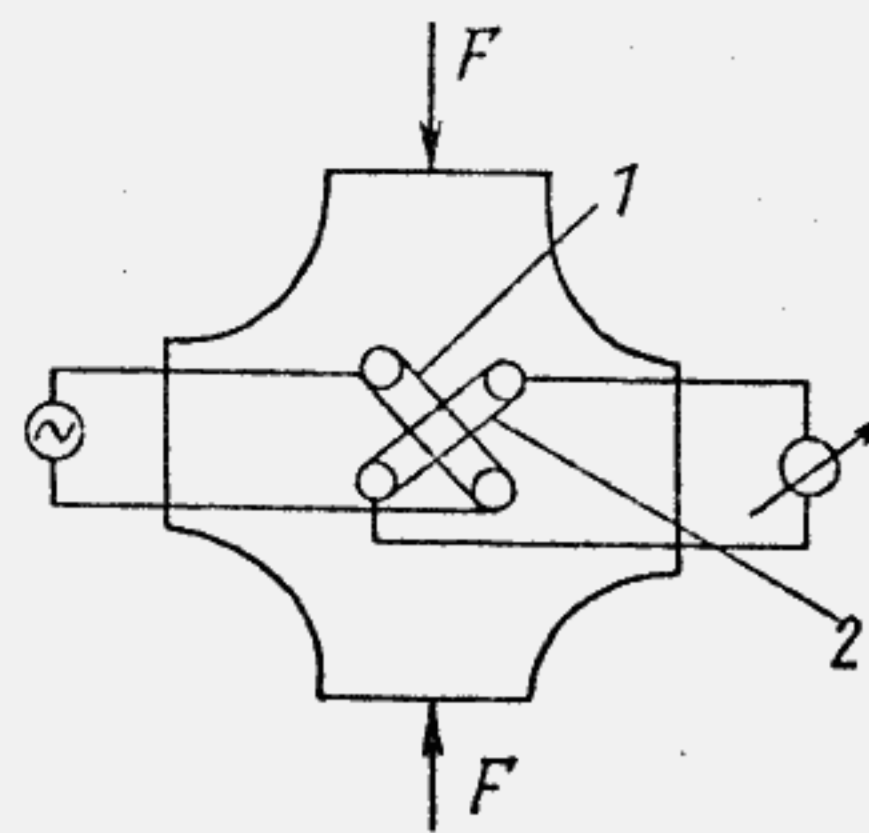


Рис.3.7

проницаемость, например, увеличивается в направлении действия растягивающихся механических сил и уменьшается в поперечном направлении. Это вызывает перераспределение магнитного потока, в результате чего в измерительной обмотке наводится ЭДС, пропорциональная приложенной силе.

Если снабдить такой преобразователь сосредоточенной на свободном конце массой, то его выходной сигнал будет пропорционален ускорению основания. В этом случае диапазон преобразующих частот ограничивается частотой намагничивающего тока, а динамический диапазон – величиной инертной массы  $M$  и собственными шумами преобразователя.

Расширение пределов измерения механических напряжений может быть достигнуто использованием для намагничивания постоянного тока, что полностью исключает шумы от магнитострикции и др.

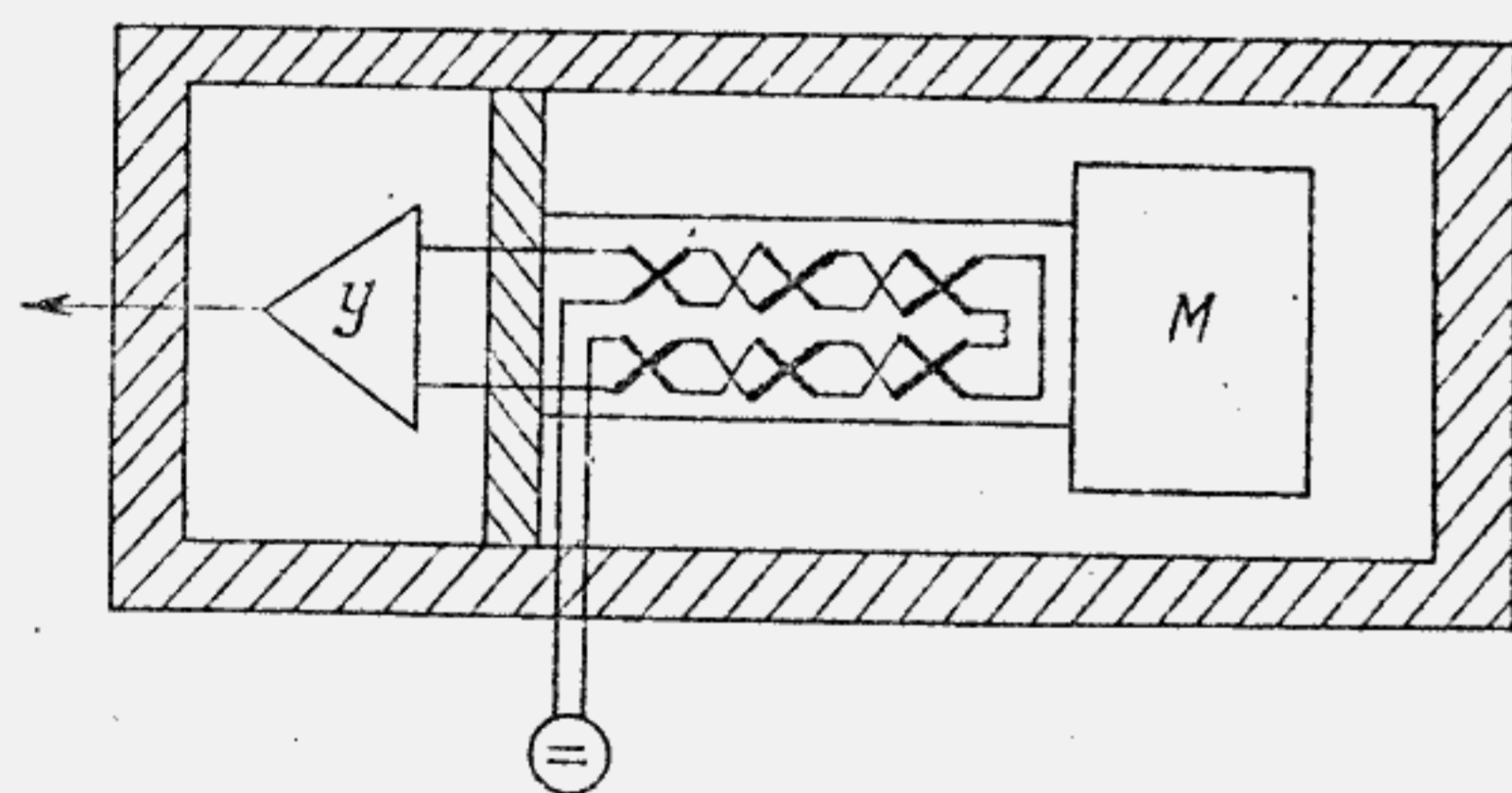


Рис.3.8

На рис.3.8 показано устройство сейсмического приемника. В нем за основу взят многоэлементный магнитосупругий дифференциальный преобразователь балочного типа, снабженный инертной массой  $M$ . Единственным ограничением при выборе величины массы  $M$  является предельная величина механических напряжений в рабочей зоне магнитопровода. Преобразователь изготовлен из листовой холоднокатанной стали Э330. Намагничивающие обмотки питаются постоянным током 0,4 А от сухих батарей или аккумуляторов.

Заранее знать, какие будут случаи при землетрясении невозможно, поэтому принято во всех странах применять разные датчики в объеме, определяемом ресурсом источников питания на местности.

#### 4. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

##### 4.1. Физические процессы, ведущие к землетрясениям. Механизм возникновения предвестников землетрясения

Землетрясения – это явления, при которых земная кора и верхняя мантия постепенно подвергаются воздействию обширного поля сил. В ослабленных участках коры образуются трещины, при этом единым импульсом высвобождаются напряжения и деформации и возбуждаются сейсмические волны. В таком случае подвижки по обе стороны плоскости разрыва происходят в противоположных направлениях. Землетрясения возникают на большой глубине под земной поверхностью, где давление очень велико. Вещество мантии поднимается под давлением по узким каналам из подземных глубин, как правило, в районах горных хребтов. Как теоретически, так и экспериментально показано, что возникающие при этом разрывы вызывают движение плит, электризацию и т.п. В отдельных местах земного шара начинает накапливаться энергия, которая вызывает деформации земной поверхности. Как только нарастающая непрерывная деформация достигает некоторого предела, на границе тектонических плит возникает землетрясение типа подвижки.

Имеются три упрощенные модели А, Б, В (рис.4.1), описывающие зависимости между величиной подвижки и временем восстановления сильного землетрясения.

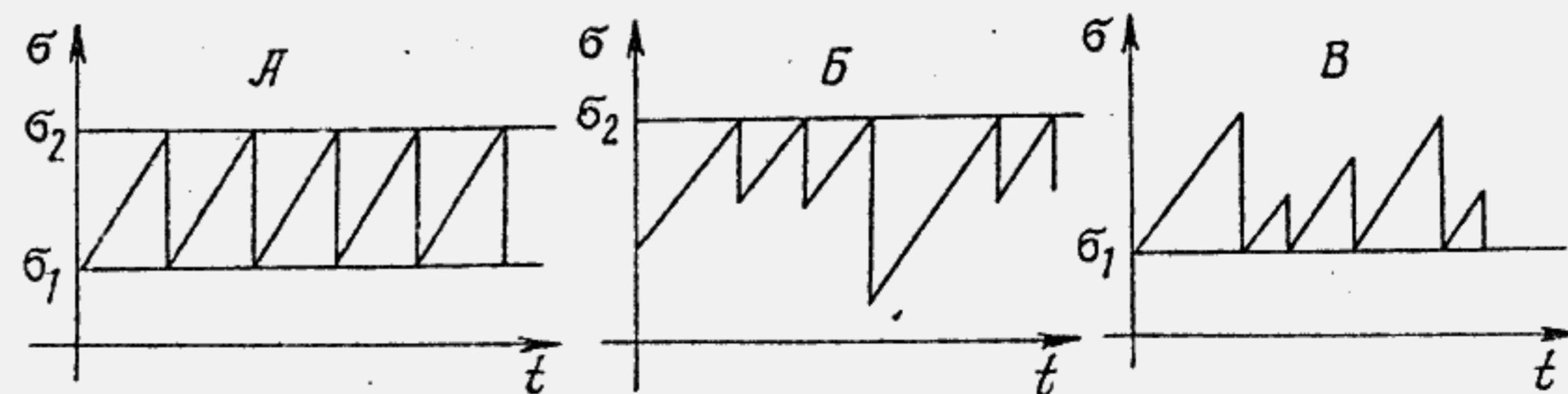


Рис.4.1



Модель А построена для случаев полной упорядоченности, когда величина проскальзывания и интервал времени между сильными землетрясениями в первом приближении равны. В модели Б интервал времени между сильными землетрясениями пропорционален величине при предыдущем землетрясении, а сильные толчки происходят тогда, когда напряжение достигает некоторого фиксированного предельного значения  $\sigma_2$  (модель прогнозируемого времени). В модели В временной интервал между крупными землетрясениями пропорционален величине подвижки при предстоящем землетрясении, а значение напряжения к моменту землетрясения не фиксировано, но, когда произойдет сильное землетрясение, напряжение падает до фиксированной величины (модель прогнозируемого смещения). В действительности ни интервал между землетрясениями, ни величина смещения не остаются постоянными, так что модель А является маловероятной.

Согласно модели Б крупное землетрясение происходит, когда достигается некоторый предельный уровень напряжений. Однако сброс напряжений в эти моменты не обязательно имеет постоянную величину. В модели В величина сброшенного напряжения флуктуирует и ограничена фиксированным нижним уровнем напряжений. После землетрясения, когда сила приложена к таким неоднородным и хрупким материалам, какими являются горные породы, число упругих толчков, вызванных возникновением мелких трещин, возрастает по мере роста уровня напряжений.

Напряжение в коре, которое резко снижается в момент предыдущего землетрясения, со временем постепенно нарастает. Когда оно достигнет предельной величины, оно высвобождается в виде подвижки по сейсмическому разлому. Следовательно, в процессе подготовки землетрясения возможно возникновение различных явлений, связанных с возрастанием уровня напряжений. Одно из таких явлений — рост сейсмической активности. Чтобы предсказать землетрясение с высокой точностью, требуемой для практических целей, нельзя обойтись без наблюдения предшествующих им явлений, показывающих, что формирование основного разрыва (подготовка сильного землетрясения) уже началось. Поэтому необходимо рассмотреть, в каких случаях и каким образом возникают предвестники землетрясений.

## Механизм возникновения предвестников землетрясения

Процесс предсказания землетрясений целесообразно разделить на следующие три стадии: предсказание на отдаленное будущее, долгосрочное предсказание и прогноз.

Собственно прогноз землетрясений, или одновременное предсказание времени, места и силы землетрясений, делится на долгосрочный (несколько лет), среднесрочный (месяцы) и краткосрочный (дни и часы). Возможность прогноза землетрясений зависит от того, происходят ли явления, предвещающие образование основного разрыва (сильного землетрясения), и можно ли эти явления проследить.

Если хрупкое оконное стекло постепенно изгибать, оно раскалывается внезапно, без всяких предваряющих явлений. Момент этого раскола прогнозировать практически невозможно. Но что происходит при изгибании менее хрупкого стекла или, например, бруска гранита, который также является хрупким твердым материалом? Уже за некоторое время до того, как достигается предел прочности, начинают образовываться микротрещины, усиливается акустическая эмиссия, увеличиваясь особенно резко к моменту разрушения.

В неоднородных материалах имеется много слабых мест, соответственно локальные деформации и трещины образуются в этих местах даже при относительно низких напряжениях и постоянно увеличиваются по мере возрастания уровня напряжений.

Следует отметить, что деформируемые породы обладают разными физическими эффектами: пьезоэлектрическим, магнитострикционным, зависимостью электрического сопротивления от давления и др.

Долгосрочный прогноз в мировой и отечественной науке разработан достаточно глубоко: по территории СССР с вероятностью около 0,7–0,8, что находится на уровне мировых прогнозов. Среднесрочный и краткосрочный прогноз с вероятностью, достаточной для предупреждения населения СССР, в настоящее время не разработан.

Мировая и отечественная сейсмология располагают столетним опытом изучения сильных землетрясений и предвестниковых эффектов. Известно, что подготовка сильного землетрясения сопровождается предвестниками, такими, как аномальные деформации земной коры; изменения слабой сейсмичности, микросейсма, геомагнитных и гесэлектрических полей, температуры, химического состава



подземных вод, выхода различных газов на поверхность. Всего известно и зарегистрировано более сотни явлений, которые могут играть роль предвестников.

Особенностью проявления предвестников является их нестабильность и многоликость: аномалии геофизических и гидрогеохимических полей чаще всего выражены нечетко, имеют мозаичную пространственную структуру, по-разному развиваются во времени; сильные землетрясения каждой сейсмоактивной зоны имеют свои характерные черты подготовки, предвестниковые эффекты каждого отдельного землетрясения в значительной мере индивидуальны.

#### 4.2. Магнитуда сейсмических колебаний

Для количественной оценки масштаба землетрясений предлагались разные меры, и, несомненно, самой удачной была среди них шкала магнитуд.

Магнитуда землетрясений, по существу, является величиной относительной. Шкала магнитуд определяет землетрясение стандартного масштаба и оценивает другие землетрясения по их максимальным амплитудам относительно этого стандартного масштаба при идентичных условиях наблюдения. Это непосредственно видно из определения Рихтера

$$M = \lg [A(D) / A_0(D)] = \lg A(D) - \lg A_0(D),$$

где  $D$  — эпицентральное расстояние,  $A_0$  и  $A$  — максимальные амплитуды записи на определенном сейсмографе для стандартного и измеряемого событий соответственно. Стандартное землетрясение, отвечающее значению  $M=0$ , т.е.  $\lg 1$  в формуле Рихтера, — это землетрясение, при котором максимальная амплитуда записи на сейсмографе Вуда-Андерсона равна 1 мкм на расстоянии  $D = 100$  км.

Зная характеристику сейсмографа, можно получить уравнение связи магнитуды  $M$  с амплитудой движения грунта  $a$  в мкм:

$$M = \lg a + 3 \lg D - 2,92.$$

Это уравнение имеет более широкую область применения, чем предыдущее, и его можно использовать при любом типе сейсмографа, если известна точная амплитуда колебаний грунта  $a$ .

В дальнейшем в определении магнитуды вводили еще и другие изменения, так что теперь стало возможным измерить величину отдаленного или глубокого землетрясения. Для этого используют

магнитуду поверхностных волн  $M_R$  и магнитуду объемных волн  $M_p$ .

Наиболее сильные землетрясения имеют по шкале Рихтера магнитуду  $M=8,5$ . Шкала магнитуд дает относительную оценку масштаба землетрясения. Иными словами, по ней можно количественно сравнивать большие и малые землетрясения, но при этом мало что можно узнать о физических свойствах источников этих землетрясений. Чтобы конкретнее говорить о параметрах сейсмического источника, надо связать эту шкалу с таким основным физическим параметром, как энергия.

Опуская промежуточные выкладки по расчету плотности кинетической энергии движения грунта, можно получить выражение связи магнитуды  $M$  с энергией  $E$ , измеряемой в эргах:

$$\lg E = 11,8 + 1,5M.$$

Если  $M$  увеличивается на 1, то  $E$  умножается на коэффициент  $10^{1,5}$ , т.е. увеличивается примерно в 32 раза. Другими словами, сейсмическая энергия землетрясения с магнитудой  $M=6$  примерно в 32 раза больше, чем у землетрясения с  $M=5$ , и в 1000 раз больше, чем у землетрясения с  $M=4$ .

Если магнитуда и энергия характеризуют силу землетрясения в его очаге, т.е. в глубинах земных недр, то интенсивность сейсмических колебаний на поверхности Земли характеризуется шкалой сейсмической балльности.

Сейсмическая шкала состоит из двух частей: описательной (макросейсмической) и инструментальной. Описательная шкала основана на описаниях повреждений типовых построек. В настоящее время создана международная шкала *MSK-64*, которая используется у нас и в ряде европейских стран. Количественные параметры интенсивности колебаний приведены в таблице.

Таблица

Интенсивность, балл	Интервалы максимальных ускорений грунта при периоде $T$ с, $\text{см}/\text{с}^2$	Интервалы максимальных скоростей колебаний грунта, $\text{см}/\text{с}$
6	30-60	3,0-6
7	61-120	6,1-12
8	121-240	12,1-24
9	241-480	24,1-48



Из таблицы видно, что интенсивности землетрясения до 5 баллов не являются сколько-нибудь опасными, хотя могут происходить небольшие повреждения обычных зданий, например в виде трещин в штукатурке и т.п. Землетрясения с интенсивностью 6 и более баллов представляют значительную угрозу и являются объектом прогноза.

#### 4.3. Общие требования к прогностическим измерительным системам (сетям)

Указанные выше особенности предвестников определяют стратегию прогноза землетрясений как получение надежного результата — прогноза на основе ненадежных исходных данных, т.е. на основе отдельных предвестников. Поэтому система (сеть) сейсмического прогноза должна обеспечивать комплексное изучение сейсмических, геофизических и гидрогеохимических полей. Она должна обладать высокой плотностью пунктов наблюдений, чтобы выявлять слабые, пространственно-неустойчивые аномалии, должна анализировать и обогащать непрерывно поступающую информацию.

Прогноз землетрясения осуществляется как многоступенчатый процесс в соответствии с проявлением долго-, средне- и краткосрочных предвестников и имеет вероятностную основу.

Вероятность правильного прогноза растет с приближением сильного землетрясения по мере развития предвестниковых эффектов, при этом осуществляется временное усиление наблюдательной сети в районе ожидаемого эпицентра, повышение оперативности и глубины анализа данных. Каждое сильное землетрясение дает свой вклад в опыт прогноза, алгоритмы прогноза совершенствуются на основе опыта наблюдений. Прогностическая система должна обладать гибкостью, возможностью расширения и адаптации к новым методам измерений и прогноза землетрясений. В последние годы в мировой и отечественной науке обнаружено большое количество предвестников землетрясений, из которых порядка 20 могут быть реально использованы.

Основная методология — комплексное использование этих предвестников в сочетании с их оперативным анализом. Показано, что последовательное применение долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных предвестников различной природы позволяет довести надеж-

ность краткосрочного прогноза разрушительного землетрясения до вероятности порядка 0,8. Именно такой подход обеспечил 7 краткосрочных прогнозов (по данным ЮНЕСКО). Он признан в настоящее время единственно правильным и реализуется сейчас в Японии, США и КНР. В одном случае в КНР была обеспечена своевременная эвакуация населения за 2 часа до катастрофического землетрясения.

#### 4.4. Виды измерений и предвестников, используемых для прогнозирования землетрясений

##### Сейсмологические измерения

Сейсмологические измерения — это исследование параметров сейсмических сигналов в объемных и поверхностных волнах как самостоятельного геофизического процесса, несущего информацию с напряженным состоянием среды.

Предвестником является изменение параметров сейсмического поля в исследуемом динамическом и частотном диапазоне во времени и пространстве по сравнению с установившимся в течение определенного времени.

##### Измерения деформаций и наклонов земной поверхности

Эти измерения — комплексное исследование параметров поля деформаций и наклонов земной коры на значительной площади с одновременным измерением параметров внешних условий (температура, уровня воды в скважине, давления и т.п.).

Предвестниками являются аномальное изменение скорости хода наклонов и деформаций, наблюдаемое за время от нескольких суток до месяцев перед событием.

##### Гидрогеологические измерения

Гидрогеологические измерения, связанные с решением сейсмологических задач, имеют целью изучение реакции водоносных систем на сейсмические толчки и процессы подготовки землетрясений.

Предвестниками являются изменения показателей режима подземных вод: пластового давления, которое определяется по уровню воды в скважине; температуры подземных вод; расхода скважины и источников.



## Геохимические измерения

Геохимические измерения – исследование хода геохимических полей в зависимости от стадии подготовки землетрясений, а также геохимические реакции на химические и ядерные взрывы.

Информативными предвестниками являются те из них, которые отражают объективно существующий процесс изменения Р–Т условий в очаговой зоне землетрясений, сопровождающих усиление субвертикального движения флюидов, несущих полезную информацию о процессах подготовки землетрясений.

Предвестниками являются изменения содержания: в атмосфере почв и в подземных водах радона  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -активности; гелия в воде и свободных газах, рН изливающихся подземных вод и их электросопротивление и др.

## Электромагнитные измерения

Электромагнитные измерения представляют собой комплекс электрических, магнитных и собственно электромагнитных колебаний, которые порождаются механическими процессами в различных породах при подготовке землетрясений. Электромагнитные измерения подразделяются на: электрометрические, магнитного поля и электромагнитного поля.

В свою очередь электрометрические наблюдения подразделяются на три вида:

- электровариометрические;
- электротеллурические;
- дипольные зондирования.

Магнитные измерения предполагают измерения абсолютного значения напряженности магнитного поля Земли  $H$ .

Электромагнитные измерения предполагают регистрации излучения в радиочастотном диапазоне для определения строения литосферы Земли.

### Результаты полевых наблюдений

Аномалии земного электрического (электротеллурического) потенциала, предшествующие землетрясениям, могут быть подразделены на два вида.

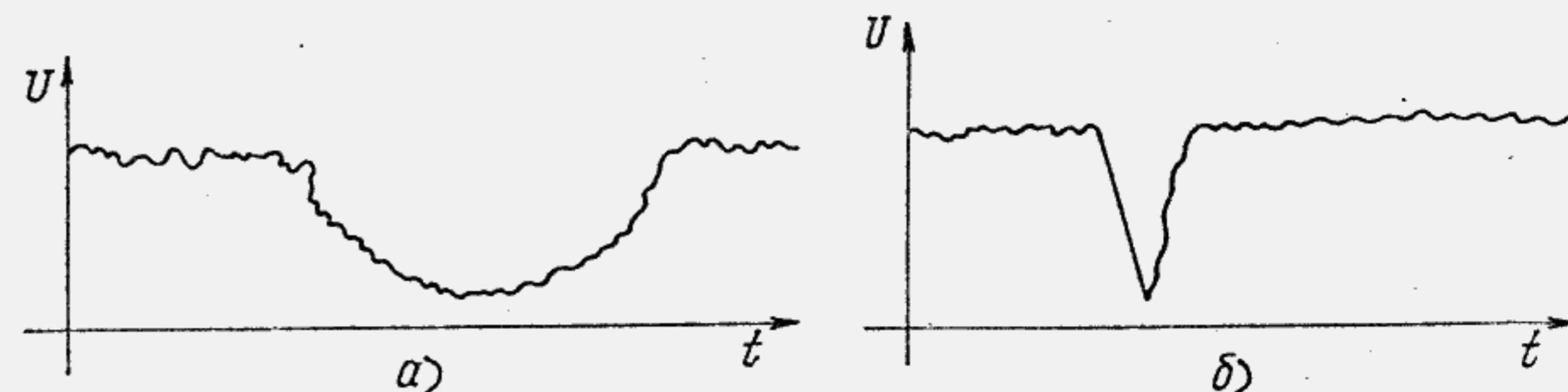


Рис. 4.2

Аномалии первого рода имеют бухтообразную форму (рис. 4.2, а), продолжительность несколько суток, значения 10–100 мВ при разнесении электродов (датчиков электротеллурического поля) на 100 м. Во всех случаях предвестников непосредственно перед землетрясением вариации потенциала возвращаются к невозмущенному уровню. Высказывается предположение, что продолжительность вариации, по-видимому, пропорциональна magnitude землетрясения. Эмпирически установлено, что время возникновения аномалии первого вида возрастает с увеличением magnitude.

Аномалии электротеллурического поля второго вида имеют импульсный характер (рис. 4.2, б) продолжительностью 1–90 мин, значения от десятых долей вольта до десятков милливольт, наблюдаются за 6–120 ч до землетрясения.

Регулярные наблюдения за изменением потенциала электротеллурического поля перед землетрясениями в СССР начались с 1959 г. на полуострове Камчатка; проводятся также в Японии, США, Китае и Греции.

Вариации атмосферного электрического потенциала имеют длительность от нескольких минут до нескольких часов, значения поля 15–150 В/м на расстоянии 10–50 км от эпицентра и быстро затухают по мере удаления. Вариации атмосферного электрического поля (АЗП) существенным образом зависят от метеорологических условий и времени суток, возникают за несколько часов до землетрясения.

Импульсные предвестники электромагнитного излучения (ЭМИ-предвестники) составляют частоты от 10 Гц до 20 МГц. Аномалии ЭМИ наблюдаются за несколько часов или несколько суток до землетрясения, максимум их интенсивности может совпадать с событием или предшествовать ему.

В настоящее время проблема изучения аномалии ЭМИ-предвестников землетрясений находится на первой стадии научно-исследования



тельских работ. Данные, полученные на Ташкентском геодинамическом полигоне, свидетельствуют об отсутствии эффектов в ЭМИ от глубоководных землетрясений.

#### Механизмы генерации и моделирование электромагнитных предвестников землетрясения

Имеет место попытка представить модель источника электромагнитных возмущений перед землетрясением как совокупность механоэлектрических преобразователей (МЭП) в земной коре. Концепции о коллективном возбуждении множества МЭП придерживаются многие авторы. МЭП, являющиеся элементарными излучателями, могут быть основаны на электризации при трении и разрушении, пьезоэлектрическом эффекте, релаксационных разрядных процессах, изменении контактных разностей потенциалов, колебаниях двойных электрических слоев и др. До настоящего времени продолжают появляться работы, предлагающие новые механизмы генерации ЭМИ-предвестников, так как имеет место совокупность множества явлений.

Согласно существующим представлениям вариации земного электрического потенциала могут быть обусловлены процессами разделения и релаксации зарядов при деформировании земных пород. Теоретически рассчитываются вариации поля, вызванные электрокинетическим эффектом. Причина электрокинетических эффектов — адсорбция ионов из растворов на поверхностях трещин и образование двойных электрических слоев. Эти эффекты могут действовать в течение всего интервала активной деформации в процессе подготовки землетрясения и заканчиваются при разгрузке среды землетрясением.

Имеются теоретические оценки вариации электротеллурического поля в результате изменения электропроводности пород в зоне разрушения. Как известно, перед землетрясением обычно наблюдается уменьшение электропроводности земной коры на 10–20 %.

Аномальные вариации атмосферного электрического потенциала (АЭП) могут быть обусловлены пространственно разнесенными разноименными зарядами или движением электрических зарядов при возбуждении МЭП. Вариации АЭП могут быть связаны с полями рассеяния на краях трещин и полтризованных областей. Регистрируемые аномалии АЭП, по-видимому, могут представляться как отбрасывающая импульсных возмущений.

Для физического моделирования вариации АЭП используются эксперименты с подземными химическими взрывами.

Источниками импульсных аномалий ЭМИ могут быть все входящие в понятие МЭП механоэлектрические явления.

Один из возможных механизмов генерации аномалий ЭМИ — электрические разряды в земной коре. В очаге подготовки землетрясения максимальные значения плотности разделенных зарядов  $\sigma = 10^{-10} \dots 10^{-2} \text{ Кл/м}^2$  создаются в процессах электризации при трении и разрушении материалов. При таких значениях  $\sigma$  локальные электрические поля достигают значения  $E = 10^8 \dots 10^9 \text{ В/м}$ , что превышает пробойные поля горных пород и приводит к релаксации локальных разрядов в микросекундном интервале. При разрядах наблюдаются вариации ЭМИ в диапазоне частот от 5 кГц до 12 МГц, иногда одновременно со световой вспышкой.

Дополнительно к этому механизм также обусловлен колебаниями дислокаций при прохождении акустической волны в породах, а также сближением и раздвижением заряженных берегов трещин. При сближении берегов трещин, которые рассматриваются как плоский конденсатор, часть энергии переходит в ЭМИ.

Одновременно с прохождением через пункт наблюдения сейсмических возмущений от сейсмического события регистрируются электромагнитные возмущения, которые имеют длительность и период такие же, как у сейсмических волн; главную роль здесь играют волны Релея.

Перед некоторыми землетрясениями наблюдалось аналогичное увеличение ионизации в ионосфере. Возмущения в ионосфере вызваны слабыми колебаниями земной поверхности. Возможная причина сейсмоионосферных явлений перед землетрясением в том, что крупномасштабные токи в земной коре вызывают в ионосфере переменные электрические поля.

#### 4.5. Электротеллурический метод

В поверхностном слое земной коры существует так называемое теллурическое, или естественное, электрическое поле, так что всегда имеется разность потенциалов между отдельными точками, находящимися на некотором расстоянии друг от друга. Установлено, что на расстояниях до первых сотен километров от эпицентра землетрясения имеет место изменение топологии электрического поля под воздействием напряженного состояния пород.



Предвестниками являются аномальные изменения разности потенциалов двух выбранных точек приповерхностного слоя земной коры. Эти изменения выражаются в виде относительно быстрого уменьшения или увеличения разности потенциалов на величину около 25–30 % от первоначального значения с последующим медленным восстановлением. Эти изменения наблюдаются продолжительностью от десятков секунд до нескольких недель. Изменения разности потенциалов могут быть и более медленные, например в течение месяца. Землетрясение может произойти как во время существования измененной разности потенциалов, так во время или после восстановления. Имеют место и помеховые изменения разности потенциалов, вызванные другими внешними причинами.

Установка для теллурических измерений состоит из нескольких пар приемных электродов, представляющих собою датчики электрических потенциалов, регистрирующей аппаратуры и линии передачи между ними. Используются датчики двух типов.

В первом случае в качестве датчика используется пластина свинца в виде ленты длиной 1 м и шириной 10 см. Электроконтакт свинца с окружающей средой является весьма стабильным из-за постоянства окисла на его поверхности, который защищает материалы от дальнейшего окисления. Лента свинца сворачивается спиралью и помещается в скважину, глубиной не менее 2 метров (чем обеспечивается стабильный температурный режим работы датчика) в глиняной подушке и засыпается грунтом. К одному концу припаян одножильный проводник с хорошей изоляцией, который выводится наружу из скважины.

Между двумя датчиками, расположенными на расстоянии 100–200 м между проводниками, возникает разность потенциалов, которая может колебаться в пределах от нескольких десятков милливольт до 1–2 В. Электротеллурическое напряжение (его разность) изменяется во времени относительно медленно, поэтому оно непосредственно без преобразований передается по линиям передачи с малым сопротивлением на расстоянии 1–1,5 км к месту регистрации.

Принятый сигнал подается непосредственно на самописец типа КСП4 и на цифровой вольтметр В7–38, имеющие изолированные от земли входы, при помощи которых производится регистрация и ввод данных в ЭВМ для обработки. Период взятия выборок аналогового напряжения 1 час.

Обработка заключается в фильтрации сигналов-предвестников от похожих помех по выделению временного диапазона существования сигнала-предвестника, отрезая как малые по значению времени, так и большие. В этом случае вероятность правильного прогноза землетрясения составляет ~ 0,3 при наличии нескольких пар датчиков.

Второй тип датчиков представляет собой практически неполяризующийся металлический электрод, в котором контакт с внешней средой осуществляется металлом через соль этого металла. На рис. 4.3 приведено устройство электротеллурического датчика.

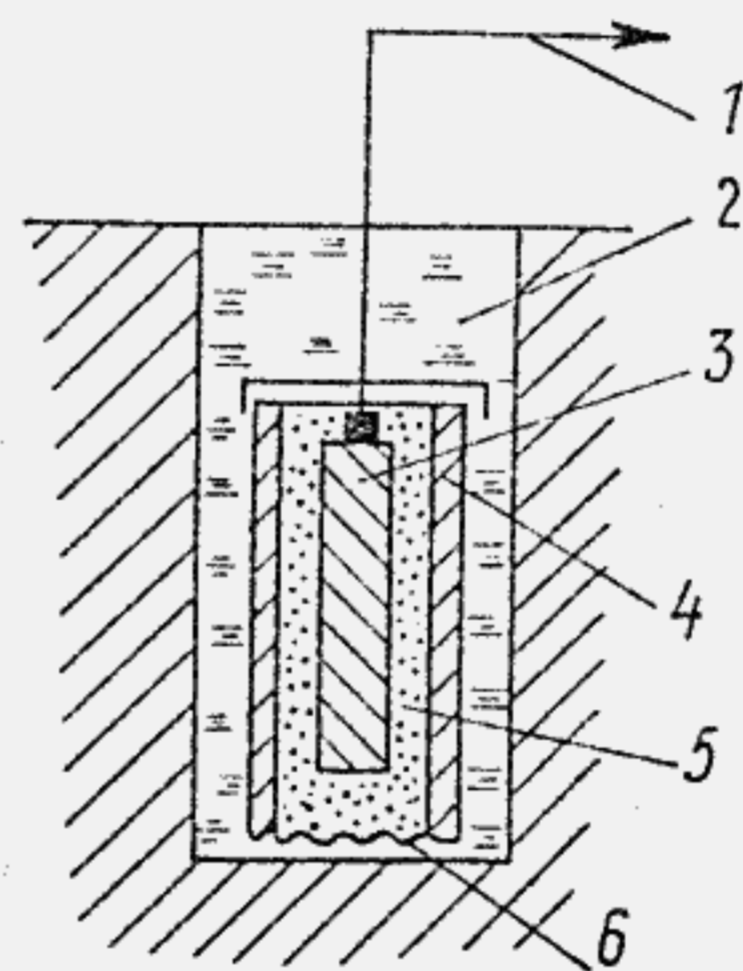


Рис. 4.3

Он представляет собой медный стержень 3, помещенный в керамический стакан 4, дно которого пористое, в виде некоторой мембраны 6. Керамический стакан диаметром 10 см заполнен раствором медного купороса 5 с крахмалом для придания этому составу малой текучести. Стакан помещается в скважину 2 не менее 2 метров глубиной и засыпается грунтом. Внешний проводник 1 припаян к медному стержню внутри стакана, который закрыт крышкой для исключения дополнительных электрических контактов со средой.

Электрические параметры этого типа датчиков выше, чем у предыдущего (чувствительность, выходное сопротивление и др.).

Такой датчик, будучи помещенный в скважину и засыпанный грунтом, нормально работает в течение нескольких лет без обслуживания.

#### 4.6. Электровариометрический метод

При воздействии напряжений в земной коре в районе будущего эпицентра деформации приповерхностного слоя распространяются в радиусе нескольких сотен километров и изменяют электросопротивление этого слоя. В зависимости от состава породы сжатие ее вызывает увеличение или уменьшение величины электрического сопротивления породы относительно некоторого установившегося значения. Предвестником является появление вариаций электрического сопротивления (или коэффициента передачи) горных пород в зависимости от изменения напряженно-деформированного состояния среды.



Для того чтобы измерить сопротивление на определенном базовом участке, подается в породу ток известной величины, и измеряется напряжение. Чтобы исключить влияние электротеллурического поля, ток задается переменной величины низкой частоты, и чтобы исключить влияние переменного напряжения промышленной частоты, выбрана частота работы генератора, равная 73 Гц; работа производится в достаточно узкой полосе частот, равной несколько герц. В качестве излучающих и приемных электродов используются графитовые стержни I длиной около 50 см и диаметром около 10 см, помещаемые в грунт (рис. 4.4, а). На рис. 4.4, б показан принцип измерения сопротивления породы.

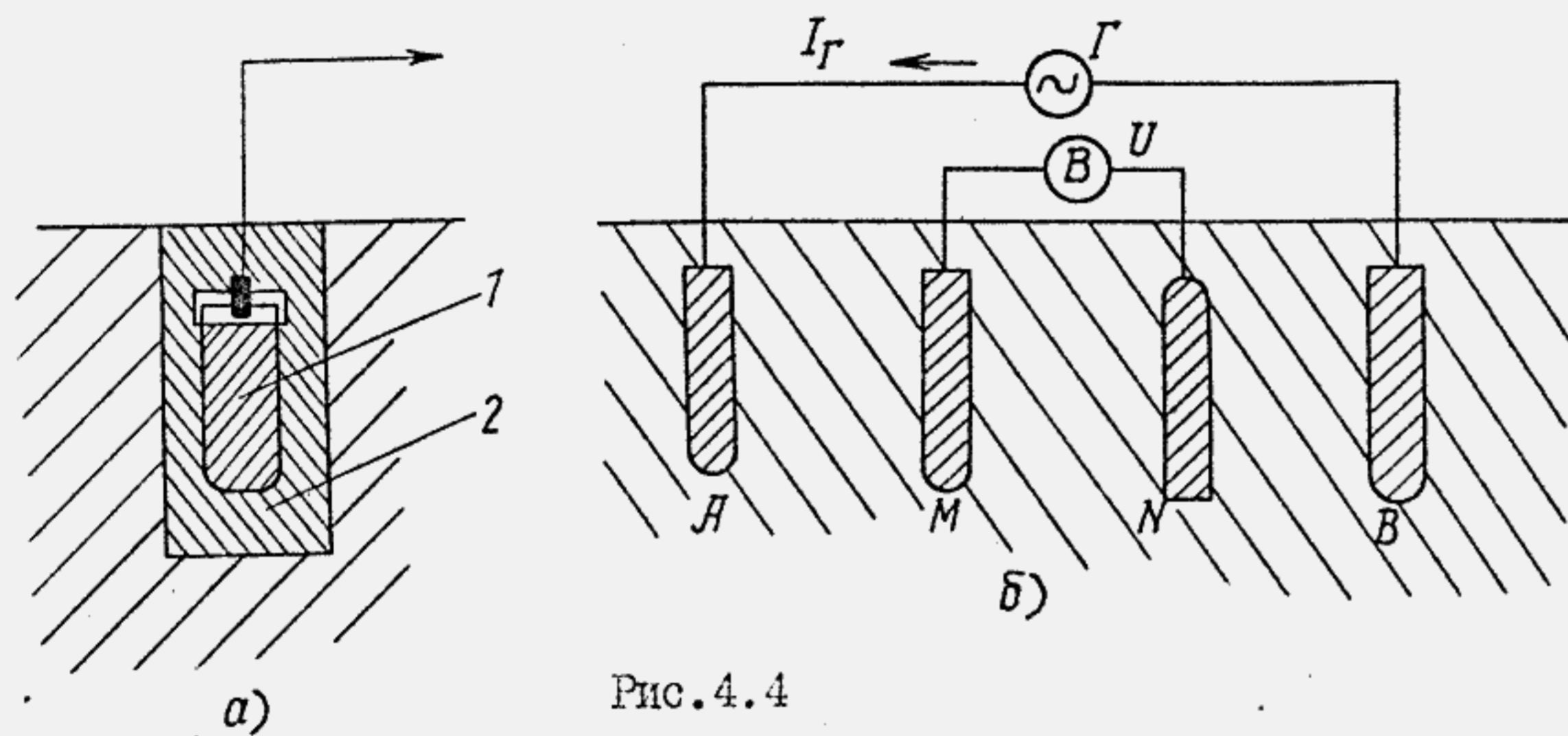


Рис. 4.4

С помощью генератора переменного тока Г в цепи электродов АВ создается ток  $I_r$ . Генератор Г вырабатывает сигнал в виде меандра с указанной частотой следования. Напряжение измеряется вольтметром В на участке МN, по измеренным данным вычисляют электрическое сопротивление на участке МN.

Ток генератора во внешней цепи составляет 200 мА, измеряется величина напряжения между точками МN. В зависимости от размеров базы АВ, тока генератора, базы МN и характера грунта величины снимаемых напряжений могут лежать в пределах от десятков милливольт до единиц вольт. В любом случае вариации измеряемого напряжения лежат в пределах  $10^{-5}$  от измеряемого напряжения. Поэтому измерительный блок электровариометра построен по схеме полностью уравновешенного компенсатора. Причем компенсация осуществляется в два этапа: сначала грубая компенсация измеряемого напряжения приблизительно до уровня величин вариаций, а затем компенсация непосредственно вариаций.

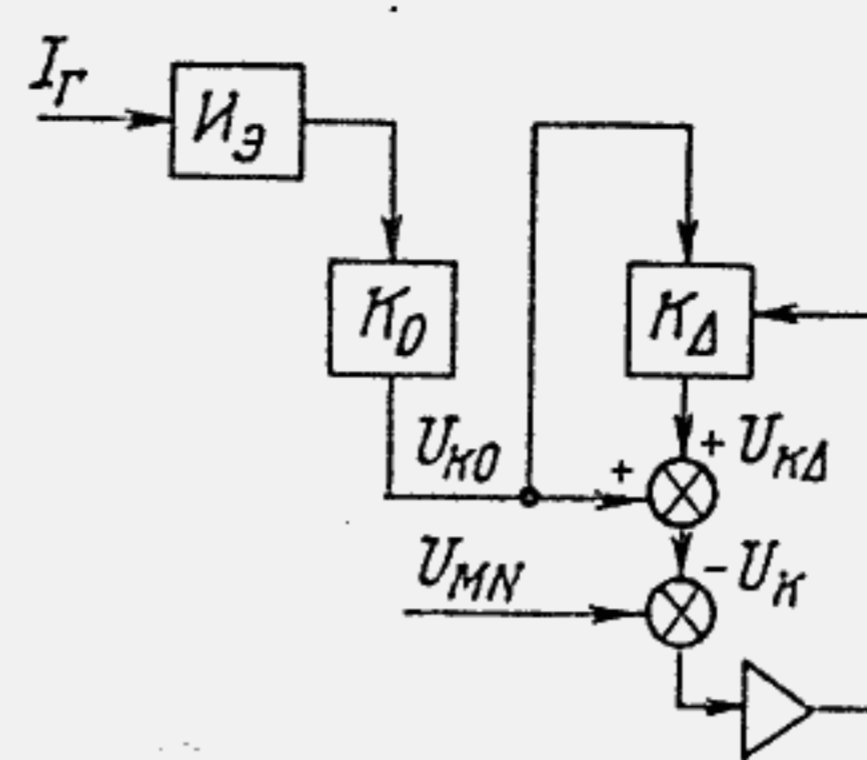


Рис. 4.5

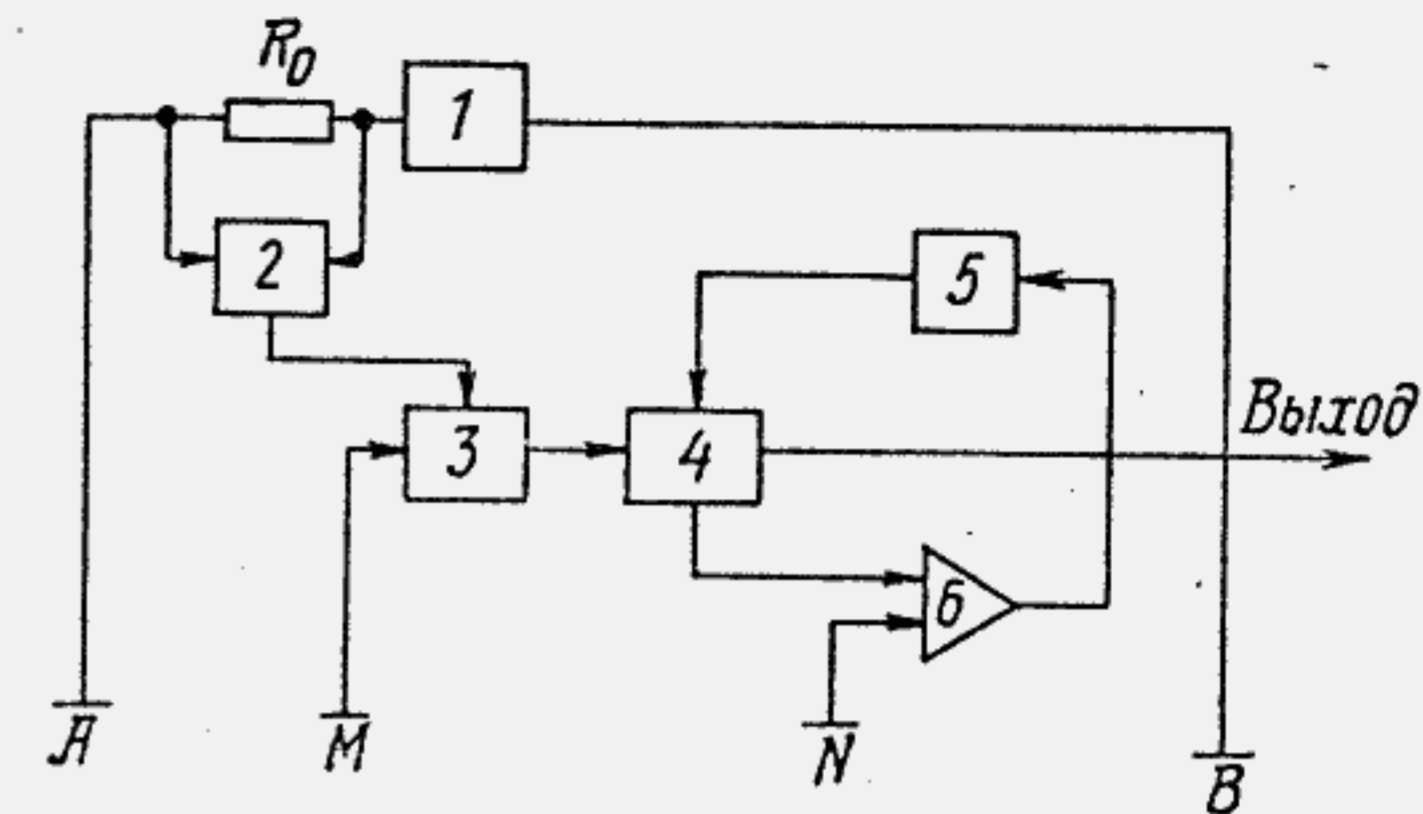


Рис. 4.6

На рис. 4.5 приведена функциональная схема двойной компенсации, где  $I_э$  — источник опорного напряжения;  $K_0$  — блок компенсации постоянной составляющей;  $K_д$  — блок компенсации вариаций измеряемого напряжения.

На рис. 4.6 приведена упрощенная структурная схема электровариометра, где 1 — генератор,  $R_0$  — стабильное сопротивление в цепи тока, 2 — источник опорного напряжения, 3 — блок компенсации постоянной составляющей напряжения, 4 — блок компенсации вариаций напряжения, 5 — цепь обратной связи, 6 — усилитель рас-согласования, А, М, N, В — электроды.

Рассматривая пространственно-временные вариации сопротивления в комплексе с вариациями других геофизических полей, можно более достоверно прогнозировать землетрясения.

#### 4.7. Метод напряженности электрического поля атмосферы

Изменение напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы, локализованное по месту, связывается по теории с выходом из Земли в приповерхностный слой атмосферы радиоактивного газа радона, который ионизирует атмосферу и тем самым изменяет проводимость воздуха, и следовательно, первоначальную напряженность электрического поля. Повышенный выход радона происходит при образовании трещин и других каналов выхода газов при явлениях, характерных этапу подготовки землетрясения за несколько суток и до одного года.

Непосредственное измерение в атмосфере количества выхода радона затруднено из-за быстрого его рассеяния движениями воздуха.



Поэтому наличие радона определяют в подпочвенном слое, когда газ еще не рассеялся, а ионизирующее излучение выходит в воздух, ионизируя атмосферу; такое определение радона, вообще говоря, является затруднительным.

Указанный метод и аппаратура удобны при измерениях в подвижном наблюдательном пункте на автомобиле.

Предвестником, определяемым данным методом, является уменьшение вертикальной составляющей напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы.

Датчик напряженности вертикальной составляющей электрического поля является измерительным преобразователем и состоит из первичного и вторичного преобразователей. Структурная схема датчика приведена на рис.4.7.

В первичном преобразователе напряженность электрического поля  $E_z$  преобразуется в электрический ток с помощью ротационного электростатического генератора (ЭСГ), в основу которого положено явление электростатической индукции. ЭСГ представляет собой динамический конденсатор и состоит из измерительной и модулирующей металлических пластин 1,2. Измерительная пластина 2 представляет собой плоскую трехсекционную пластину, защищенную от попадания влаги. Модулирующая пластина 1 по конфигурации подобна измерительной пластине и может вращаться, экранируя и экспонируя измерительную пластину по отношению к полю  $E_z$ . Поток электростатической индукции измеряемого поля наводит электрический заряд на воспринимающем элементе измерительной пластины.

Модулятор — экранирующая пластина 1, вращается при помощи электродвигателя 6 и периодически экранирует и экспонирует измерительную пластину 2 в электрическом поле, благодаря чему значение наведенного на измерительной пластине заряда меняется. Натекающий и стекающий с пластины заряд создает ток в цепи нагрузки. Амплитуда этого тока пропорциональна напряженности измеряемого электрического поля, частоте вращения модулирующей пластины и площади измерительной пластины, а полярность определяется направлением вектора электрического поля у поверхности измерительной пластины. Выходной ток ЭСГ поступает в усилитель 7 и усиливается.

В составе первичного преобразователя, помимо ЭСГ, имеется еще генератор управляющего напряжения ГУН, который используется для синхронизации работы датчика и представляет собой оптоэлектронный модулятор постоянного тока, состоящий из светодиода и фотодиода 4, между ними находится модулирующая пластина 3. Обе модулирующие пластины ЭСГ и ГУН смонтированы на одном валу с муфтой 5 двигателя ЭД и подобны. Таким образом с выхода усилителя 8 ГУН снимаются синхросигналы с той же частотой, с которой идут сигналы ЭСГ.

Во вторичном преобразователе сигналы подаются на полосовые фильтры 9,13, которые настроены на частоту 140–160 Гц. Усиленный сигнал подается на синхронный демодулятор 10, ключи демодуляторов управляются напряжением прямоугольной формы. С выходов демодуляторов пульсирующие напряжения подаются на фильтры нижней частоты 11. С выхода ФНЧ сигналы подаются во внешнюю цепь.

Время установления датчика составляет 0,05; 1; 100 с. К выходам подключены индикаторы напряжения.

С выхода усилителя 8 полученные прямоугольные импульсы поступают на полосовой фильтр 13. Выделенное напряжение первой

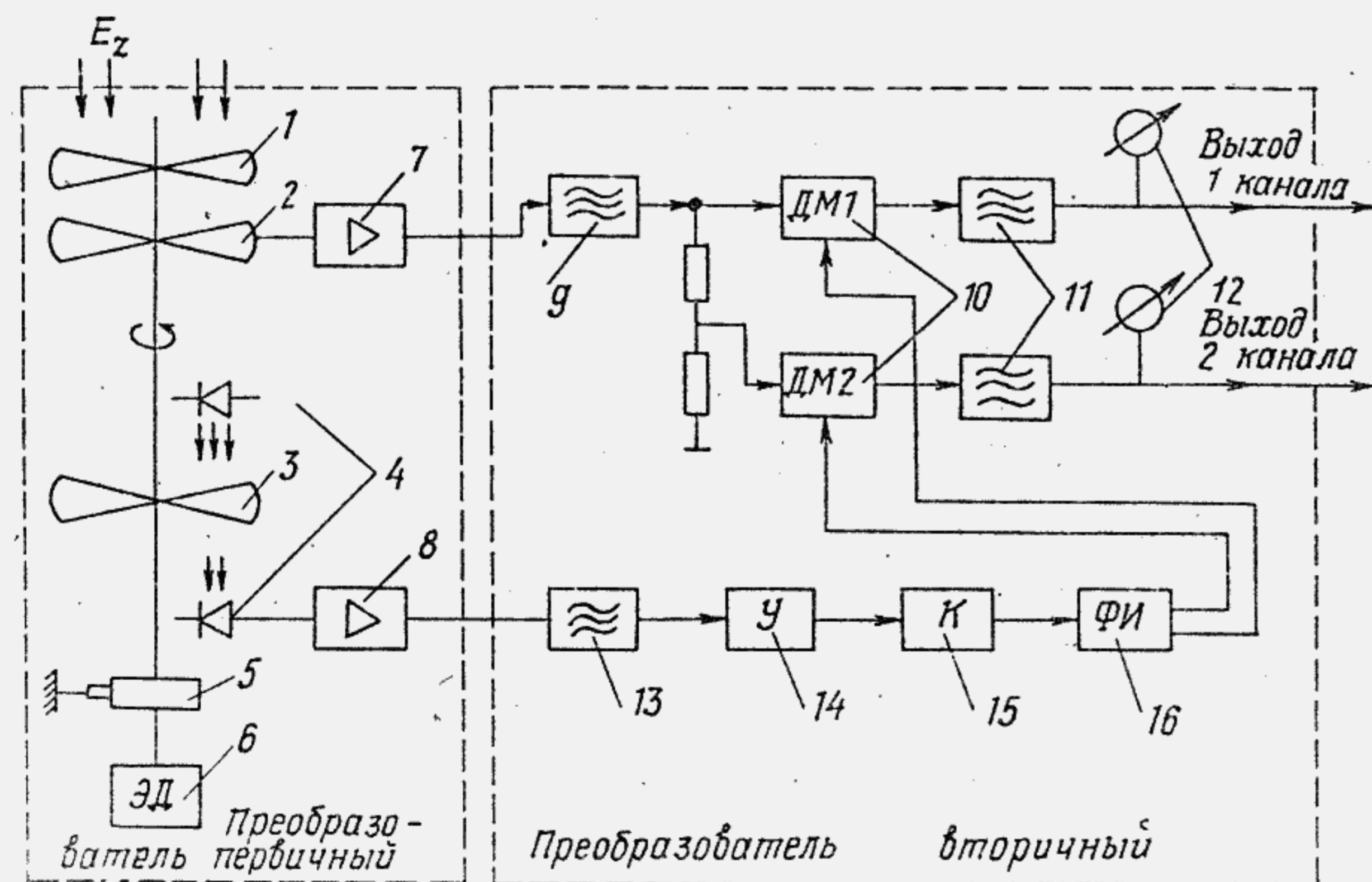


Рис.4.7



гармоники подается на фазосдвигающий каскад I4, фаза управляющего сигнала может меняться в пределах  $-60...+60^\circ$ . С выхода фазосдвигателя напряжение поступает на вход компаратора (К) I5, где формируются прямоугольные импульсы амплитудой около 12 В. С компаратора импульсы подаются на фазоинвертор (ФИ) I6, где формируются две последовательности импульсов, сдвинутые по фазе на  $180^\circ$ , которым управляются ключи ДМ.

Градуировка прибора производится экранировкой датчика от измеряемого внешнего поля вручную, установкой специальной пластины и подачей на нее напряжения соответствующей величины. Пределы измерения напряженности электрического поля по одному каналу составляют  $(\pm 500 \pm 40\%)$  В/м, по второму каналу  $(\pm 5000 \pm 40\%)$  В/м; среднее значение квадратического отклонения при измерениях составляет  $E/E_M \cdot 100\% = 1...3$ .

#### 4.8. Метод магнитного поля Земли

Экспериментально установлено, что при подготовке землетрясения появляются составляющие магнитного поля, вызванные электрическими токами при подвижках пород. Эти составляющие магнитного поля накладываются на стационарное магнитное поле Земли, изменяя его в ту или другую сторону. Магнитометрические измерения широко используются для целей изучения геодинамических процессов и прогноза землетрясений. Для этой цели используются абсолютные и относительные измерения.

Предвестником землетрясений является изменение структуры магнитного поля, наблюдаемого в одной точке. Они отличаются нестабильностью, основная прогностическая информация содержится в разностях значений модуля вектора магнитного поля, измеренного синхронно в разных пунктах. Сильным землетрясениям предшествует изменение поляризации и магнитной индукции в земной коре.

Рассмотрим измерение абсолютного значения магнитной индукции в земной коре. Магнитная индукция определяется по формуле:

$$B = \Phi / S,$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, пронизывающий площадь  $S$ , единица магнитной индукции определяется как вебер, деленный на метр квадратный, т.е.  $Вб/м^2$ . Это индукция такого однородного магнитного поля, в котором магнитный поток через площадь в  $1 м^2$ ,

перпендикулярную направлению поля, равен  $1 Вб$ ; эта единица называется тесла (Тс).

Элементарные частицы материи, в том числе атомные ядра, являются носителями магнетизма, т.е. имеют собственные магнитные моменты. Атомное ядро, имеющее собственный магнитный момент, прецессирует (вращается) в магнитном поле вокруг его направления с частотой, определяемой соотношением Лармора

$$f = \gamma B / 2\pi,$$

где  $f$  — частота прецессии в Гц;  $B$  — индукция внешнего магнитного поля Земли;  $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядра (отношение магнитного момента к механическому).

Гиромагнитное отношение ядер одного изотопа является атомной константой, не зависящей от таких внешних факторов, как температура, давление, влажность и т.д., поэтому частота прецессии ядра данного изотопа зависит только от индукции внешнего магнитного поля. Таким образом, если измерить частоту прецессии атомных ядер, то можно определить индукцию магнитного поля, в котором они находятся. Это явление положено в основу протонных (ядерных) магнитометров.

Ларморову прецессию можно представить как конусообразное движение вектора магнитного момента  $\mu$  вокруг вектора  $B$ , подобное движение вокруг вертикали оси вращения волчка, получившего боковой удар.

Для измерения магнитного поля удобнее всего использовать простейшие атомные ядра — протоны, так как они в жидкостях дают наиболее острый и интенсивный резонанс. Если поместить образец с протонами (например, сосуд с водой, спиртом, керосином и др.) в катушку индуктивности, то в последней должна возникнуть ЭДС с частотой, равной частоте прецессии протонов. Однако интенсивность сигнала (амплитуда ЭДС) будет настолько мала, что ее очень трудно зафиксировать.

В методе свободной ядерной индукции для увеличения интенсивности сигнала образец с протонами временно поляризуется вспомогательным достаточно сильным постоянным магнитным полем, приблизительно перпендикулярным к земному магнитному полю. После достижения поляризации (для воды 3 с) вспомогательное поле быстро выключается.

Время выключения должно быть значительно меньше периода ларморовой частоты прецессии в измеряемом поле. После этого вектор



магнитного момента начинает прецессировать вокруг направления земного поля с частотой, пропорциональной индукции этого поля. Интенсивность сигнала при прочих равных условиях пропорциональна индукции поляризирующего поля. Однако через некоторое время интенсивность сигнала уменьшается до прежней величины, поэтому вспомогательное поле включают периодически. Таким образом ядерно-резонансный датчик генерирует затухающую ЭДС, частота которой строго пропорциональна индукции измеряемого поля. Измерения производятся дискретно.

Датчик протонного (ядерного) магнитометра обычно представляет собой цилиндрический сосуд из оргстекла с жидкостью, содержащей протоны (керосин). Сосуд помещается в многовитковую катушку, настроенную в резонанс с частотой ожидаемого сигнала (рис. 4.8)

$$f = \frac{8}{2\pi} B.$$

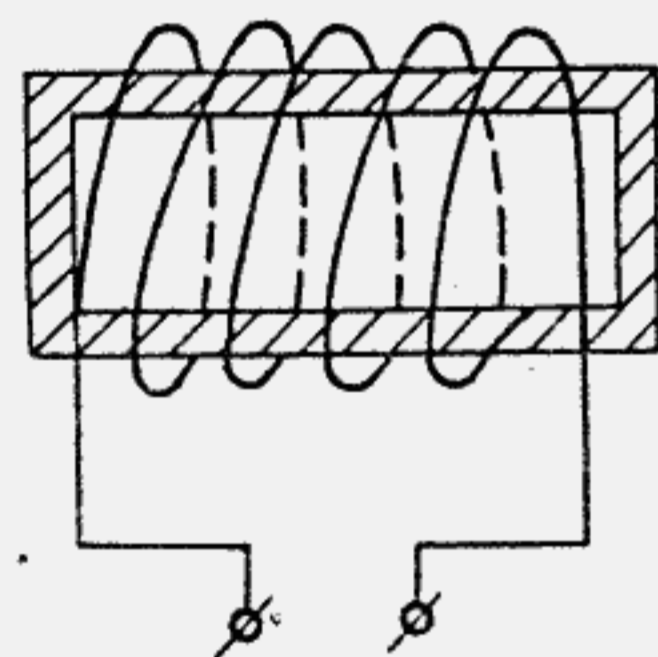


Рис. 4.8

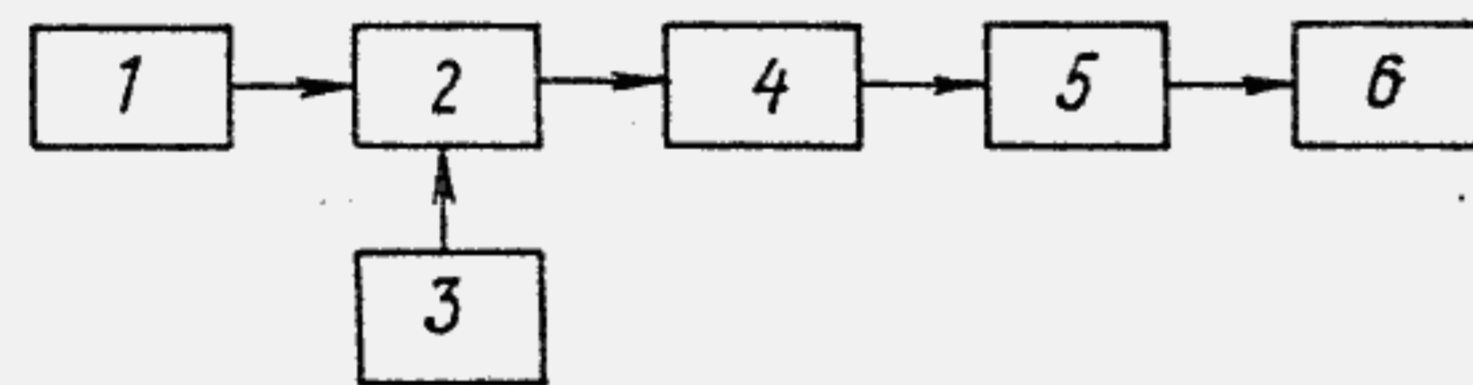


Рис. 4.9

Эта катушка используется как для возбуждения (поляризация), так и для съема сигнала в виде ЭДС, определенной частоты (эти функции катушки разделены во времени).

На рис. 4.9 приведена обобщенная структурная схема протонного магнитометра. Датчик 1 соединен с релейно переключающим устройством 2, которое автоматически осуществляет подключение датчика к поляризирующей батарее 3. Затем, по истечении определенного времени, датчик переключается на усилитель 4, и по окончании записи показаний прибор выключается. После усилителя 4 сигналы поступают в прецизионный быстродействующий частотомер 5, а затем на регистратор 6. Основным методом измерения частоты

в магнитометрах является метод подсчета периодов сигнала прецессии в течение фиксированного интервала времени.

В конструкции протонного магнитометра датчик прибора выполнен в виде отдельного блока, соединенного кабелем с пультом управления. Протонный магнитометр измеряет модуль, т.е. численное значение, индукции магнитного поля.

Датчик магнитной индукции представляет собой полый цилиндр из немагнитного материала, на который намотана обмотка из провода, например,  $\phi = 0,3$  мм с количеством витков 600. В цилиндр наливается рабочая жидкость — керосин. Работает датчик следующим образом. В катушку подается ток 0,15–0,5 А на время порядка 10 с. Магнитные моменты почти всех протонов устанавливаются в направлении магнитного поля. Затем ток катушки выключается, а протоны начинают прецессировать вокруг оси земного магнитного поля, переходя в исходное энергетическое состояние. Частота прецессии пропорциональна плотности потока поля, за счет чего в катушке наводится ЭДС, частота которой лежит в пределах от 1,5 до 2,5 кГц.

Поле Земли имеет величину, разную для разных регионов, в пределах от  $20 \cdot 10^3$  до  $90400^3$  нТс; оно изменяется на 5–6 нТс при подготовке землетрясений. Датчик магнитометра устанавливается на треноге из немагнитных материалов устойчиво над поверхностью Земли. Влияние ионосферы устраняется за счет разности показаний двух магнитометров, разнесенных на расстояние 5–6 км.

#### 4.9. Метод измерения импульсного электромагнитного излучения

В последнее время все более широкую популярность получают исследования электромагнитных излучений (ЭМИ) земной коры в целях прогноза землетрясений. Это обусловлено тем, что ЭМИ, возбуждаемые механоэлектрическими процессами в очаге будущего землетрясения, наиболее интенсивно проявляются на заключительной стадии подготовки сейсмического события, т.е. в период начавшегося процесса разрушения горных пород, и могут сыграть определяющую роль при оперативном прогнозе момента подземного толчка. Проведенные длительные непрерывные наблюдения в различных сейсмоактивных районах показывают перспективность исследований вариации интенсивности ЭМИ в радиоволновом диапазоне частот с целью выявления оперативных предвестников сильных землетрясений. Предвест-



ником является появление импульсов электромагнитного излучения в диапазоне частот от единиц герц до нескольких мегагерц.

В связи с тем, что электромагнитный сигнал, отражающий изменение напряженно-деформированного состояния, имеет определенный характеристический спектр для отдельной разновидности горных пород, проблема изучения спектральных и временных характеристик этого излучения весьма актуальна и находится в стадии развития.

При регистрации импульсов ЭМИ можно относительно просто отделиться от помех, создаваемых другими излучениями, в силу небольшой известной полосы частот импульсов ЭМИ. Основным фоновым источником рассматриваемого ЭМИ являются грозовые молниевые разряды.

В настоящее время создан большой банк сигналов импульсных молниевых разрядов, изучены их спектральные характеристики и временные зависимости при помощи специальной аппаратуры. Так что известен обобщенный образ электромагнитных импульсов грозовых разрядов. В результате изучения образа, например в виде формы импульса-предвестника в зависимости от времени, можно, используя существующую технику на основе ЭВМ, достаточно достоверно различать образы ЭМИ импульса-предвестника и импульса молниевых разрядов.

#### 4.10. Метод использования гидробионтов при регистрации электромагнитных предвестников землетрясений

Практически любые процессы, происходящие в водной среде, сопровождаются возникновением электрических полей. Это обстоятельство, а также высокая электропроводность воды и различия электрических свойств многих водных объектов способствовали развитию у рыб в процессе эволюции высокой электрической чувствительности. Около 300 видов рыб имеют специальные электрорецепторы, и они оказались единственными животными, способными воспринимать окружающий мир с помощью электрических полей.

Эти особенности гидробионтов послужили одной из причин использования их в качестве биоиндикаторов электрических полей при поиске предвестников землетрясений. Второй причиной, побудившей развитие исследований, явились многочисленные сообщения о случаях аномального поведения представителей многих видов рыб перед землетрясениями.

В качестве основного биообъекта в исследованиях использовалась рыба нильский слоник, обладающая высокой чувствительностью к слабым электрическим полям. Главной особенностью этой небольшой (длиной до 20 см) рыбки является наличие у нее электрогенераторного органа. Имеется положительный опыт использования нильского слоника в экспериментальных условиях более 5 лет, из которых 4 года — на Гармском геофизическом полигоне при поиске предвестников землетрясений.

Наблюдения за нильскими слониками ведутся путем регистрации их электрической активности. В качестве датчиков используются помещенные в аквариум электроды из нержавеющей стали. Сигналы с электродов поступают на предусилитель и далее по кабелю в аппаратуру.

Обработка заключается в подсчете количества импульсов в час. При режимных наблюдениях подсчет количества импульсов осуществляется каждые 5 мин. Наличием электромагнитного предвестника является повышение электрической активности рыб, т.е. повышение частоты генерируемых ими электрических импульсов.

#### 5. МЕТОД ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

##### 5.1. Принцип получения изображения источников ионизирующего излучения

В связи с развитием космических исследований и дальних космических полетов встает проблема обнаружения, регистрации и получения изображения удаленных объектов в рентгеновских и гамма-лучах. Решаются задачи составления звездных карт неба в указанном спектре излучения.

Как получить изображение удаленного объекта, который излучает только, например, в рентгеновском диапазоне? Телескопы и камеры с обычными линзами и зеркалами практически бесполезны. Рентгеновские фотоны низких энергий (в отличие от фотонов видимого света) обладают энергией, достаточной для того, чтобы оторвать электроны от атомов в материале линзы, поэтому они задерживаются линзой. Рентгеновские фотоны высоких энергий могут пройти через линзу, но так как они не подвергаются значительному отклонению, фокусировка их не происходит. Рентгеновские фотоны



низких энергий можно сфокусировать только тогда, когда они попадают на поверхность, многократно отражаясь под "скользящим" углом падения.

Отражение под скользящим углом падения, однако, становится менее эффективным, по мере того как увеличивается энергия рентгеновских фотонов; при этом угол отражения становится меньше. Поэтому для рентгеновских телескопов высоких энергий необходимы зеркала очень большой площади, а создание таких отражающих поверхностей, обладающих совершенными качествами, требует огромных средств. Таким образом, метод получения изображения со скользящим углом падения неприемлем для рентгеновского излучения с энергией выше 10 кэВ, что соответствует фотонам с длинами волн короче 0,12 нм.

Так как же можно получить изображение объектов, которые излучают рентгеновские фотоны высоких энергий?

Если между точечным источником рентгеновского излучения и детектором, например в виде фотопленки, поместить тело с точно известной пропускающей способностью для каждой из прямых линий прохождения фотонов, то можно легко предсказать форму тени, которую он создает на фотопленке. И наоборот, зная форму тени и закон пропускания излучения телом, путем простых геометрических построений можно однозначно определить местонахождение точечного источника излучения по отношению к телу.

Можно предположить, что протяженный источник состоит из множества точечных источников, поэтому тень от любого объекта будет размываться. Дело в том, что каждый точечный источник порождает несколько различающуюся тень, фиксируемую на пленке, так как пути лучей от каждой точки источника в теле различны. Сравнивая тени, создаваемые всеми возможными комбинациями точечных источников, с реально регистрируемой тенью, можно воссоздать форму исследуемого протяженного источника.

Таким образом осуществляется регистрация отдельных рентгеновских звезд, которые на больших расстояниях можно представить в виде точечных источников и протяженных источников неизвестной формы, например огромных облаков горячей межгалактической плазмы и др.

Это — основной принцип получения изображений источников ионизирующего излучения с кодирующими масками.

## 5.2. Камера-обскура

Телом, помещаемым между источником ионизирующего излучения и детектором, является кодирующая маска. Она представляет собой пластинку с отверстиями из материала, не пропускающего данный вид излучения. Ключевым моментом в данном методе становится выбор расположения отверстий на маске, которое позволяет воссоздать изображение ионизирующего излучения по форме тени, отбрасываемой этой маской.

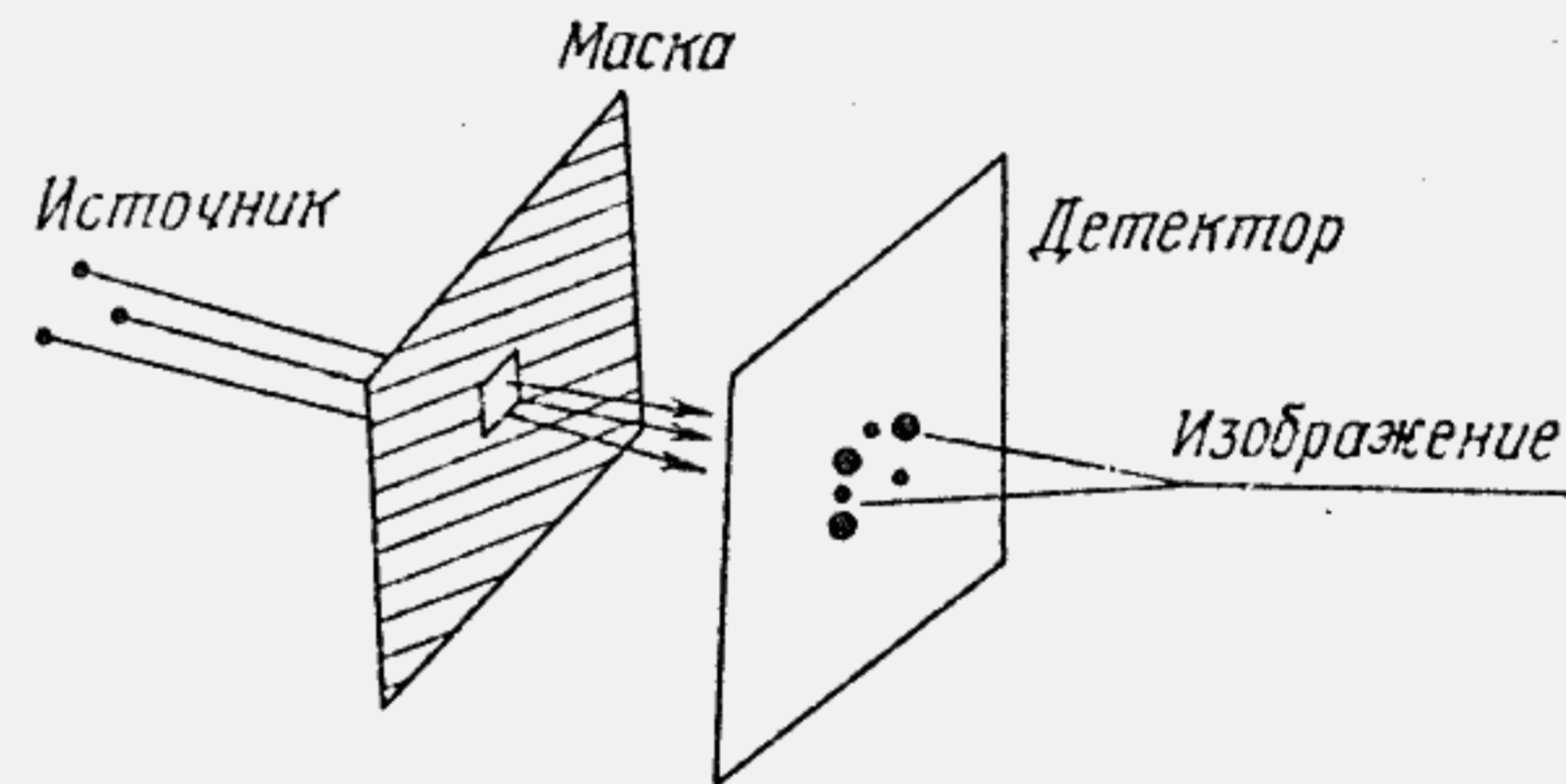


Рис. 5.1

Маска простейшей формы (только с одной небольшой дырочкой) служит особым примером построения изображений с кодирующими масками, позволяющими представить, как они действуют. По существу, устройство с такой маской является известной камерой-обскурой (рис. 5.1). Тень, отбрасываемая такой маской, является слегка размытым и перевернутым изображением источника. Разрешающая способность камеры-обскуры определяется размерами отверстия в маске и размерами кадра фотопленки, на которой производится регистрация, т.е. тем количеством элементов, которые умещаются в поле регистрации. Существенным недостатком камеры-обскуры является ее практически низкая эффективность. Четкое изображение в камере-обсуре можно получить только тогда, когда отверстие мало, но в этом случае через отверстие будет проходить весьма малое количество фотонов. Максимальная контрастность изображений на детекторе камеры-обскуры имеет место при диаметре отверстия  $d$ , который зависит от длины волны излучения  $\lambda$  и расстояния  $a$  от маски до детектора  $d \approx \sqrt{\lambda a}$ . Например, через отверстие диаметром 1 мм в маске, находящейся на борту спутника, от типичного космического



источника проходит приблизительно 1 фотон в час; маска с одним отверстием не является эффективным инструментом для получения изображений источников с малой интенсивностью излучения в точке приема. Малая эффективность обычной камеры-обскуры требует длительного времени регистрации, в течение которого на детектор пройдет через отверстие необходимое количество фотонов, чтобы превысить порог регистрации детектора. За это время в реальных условиях через отверстие на детектор пройдет значительное количество фотонов всегда существующего фонового излучения (космического, земного, наведенного и др.). Поэтому полученная на детекторе и считанная с детектора информация в виде, например, электрического сигнала будет характеризоваться малым отношением сигнал-шум.

Можно пойти прямым путем увеличения количества камер-обскур, регистрирующих один и тот же, например, удаленный точечный источник, как изображено на рис. 5.2. Если информацию считывать с блока камер-обскур (рис. 5.2) построчно, как это осуществляется в передающих телевизионных трубках, и рассмотреть одну или несколько строк, которые считывают непосредственно изображение точечного источника при наличии шума, то получим электрический сигнал,

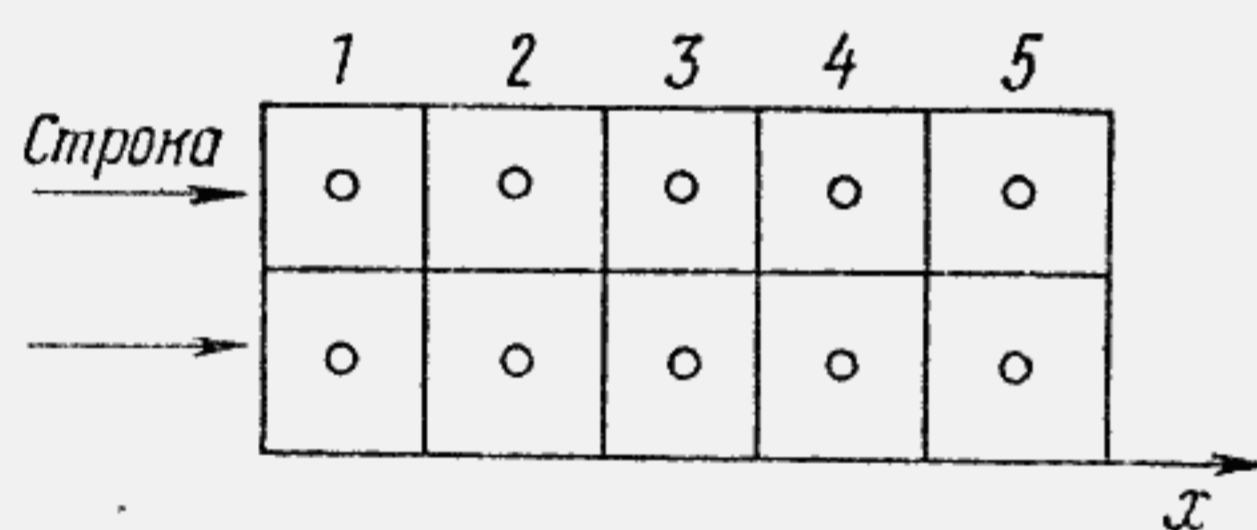


Рис. 5.2

изображений на рис. 5.3. Суммируя общий сигнал каждой строки 1, 2, 3, 4, 5 в один (т.е. накладывая эти сигналы один на другой), получим некоторое увеличение отношения сигнал-шум в суммарном сигнале, зависящее от числа камер-обскур в блоке. Импульсы, соответствующие изображению источника, будут суммироваться ли-

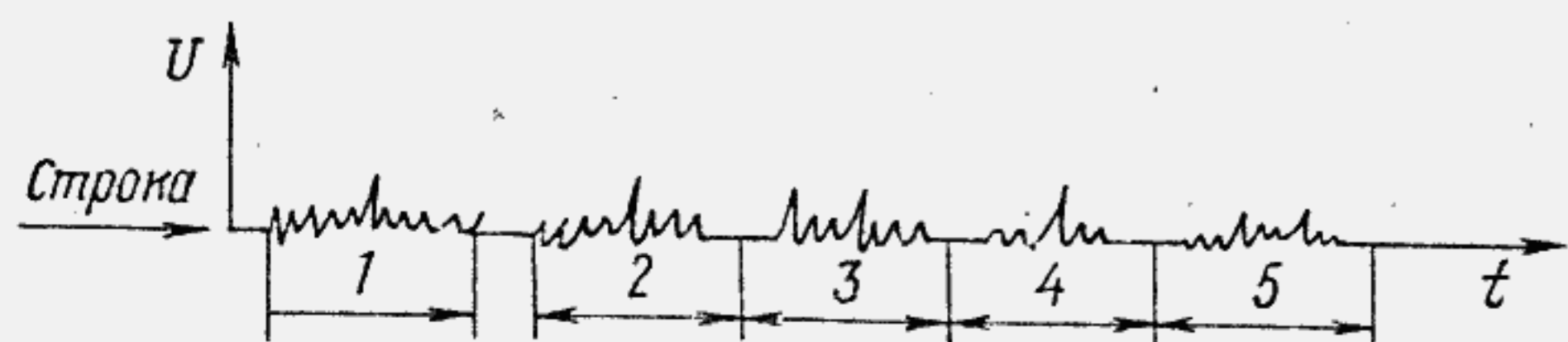


Рис. 5.3

нейно, а шумовые сигналы, распределенные случайным образом по амплитуде и по времени, будут суммироваться как  $\sqrt{U_{ш}}$ . В результате получим

$$\rho_N = \sqrt{N} \rho_1,$$

где  $\rho_N, \rho_1$  — отношения сигнал-шум для блока, состоящего из  $N$  камер-обскур, и для одной камеры-обскуры соответственно.

Недостатками данного способа повышения отношения сигнал-шум являются большие габариты и вес блока камер-обскур. Выход из создавшегося положения — сделать несколько отверстий вместо одного в одной камере-обскуре.

### 5.3. Многоотверстные маски

Несколько отверстий в одной маске вместо одного позволяет увеличить число регистрируемых фотонов, прошедших через маску, пропорционально числу отверстий в ней. Однако каждое отверстие создает собственное, слегка размытое, перевернутое изображение, поэтому детектор регистрирует суперпозицию разных изображений.

Чтобы из суперпозиции изображений получить одно четкое, нужно, во-первых, разбить всю картину источника на большое число элементов (пикселей). Затем каждому пикселу надо приписать определенную "яркость", которая соответствует потоку фотонов, излучаемых им. Каждый пиксел дает в основном одинаковую тень маски, но тень, создаваемая одним пикселом, сдвинута по отношению к тени, создаваемой любым другим пикселом. С помощью простых геометрических построений можно определить относительные положения теней, создаваемых каждым пикселом, излучающим в рентгеновском или другом диапазоне.

Рассматривая каждый пиксел по очереди, можно построить таким образом изображение. Поскольку приходится иметь дело с десятками тысяч пикселей, машинные вычисления, которые необходимо провести для того, чтобы получить изображения, далеко не тривиальны. Отсюда следует вывод о том, что указанная задача решается.

Тем не менее необходимо четко представлять себе, что тень, отбрасываемая маской, когда ее освещает один пиксел, должна максимально отличаться от тени при освещении маски другим пикселом. Иными словами, тень, отбрасываемая маской, должна очень мало походить на любое свое сдвинутое изображение. Именно поэтому важно тщательно подобрать набор отверстий для маски.



Выбор регулярного набора отверстий был бы неудачным, поскольку трансляционная симметрия такого набора могла бы привести к тому, что тени были бы неотличимы от их сдвинутых изображений, а это внесло бы большую степень неопределенности в построение изображения источника рентгеновского излучения. Значительно лучшим вариантом было бы "разбросать" отверстия по маске случайным образом. Такие маски ранее применялись. Тем не менее и этот вариант со случайным набором отверстий не является лучшим.

Вообще проблема выбора расположения отверстий на маске схожа с аналогичными задачами в других областях науки и техники. Например, цифровые коды при передаче информации при наличии помех в телеметрии должны максимально отличаться друг от друга, чтобы в случае искажения нескольких бит информации был принят правильный код. В космической телеметрии, когда имеет место большое количество разнообразных помех, информация передается в виде интервалов времени, при этом каждый интервал кодируется таким образом, чтобы в максимальной степени отличаться кодом от любого возможного интервала. При юстировке оптических систем тестовый набор отверстий должен быть таким, чтобы изображения четко отличались от своих сдвинутых изображений и т.д.

Указанными выше необходимыми свойствами обладают псевдослучайные последовательности.

#### 5.4. Псевдослучайные последовательности, матрицы и маски

Псевдослучайными (ПС) последовательностями (которые также называют псевдошумовыми последовательностями, регистровыми последовательностями и  $n$ -последовательностями) называются определенные двоичные последовательности длины  $p = 2^n - 1$ . Для построения псевдослучайной последовательности длины  $p = 2^n - 1$  необходимо знать примитивный многочлен  $h(x)$  степени  $n$ .

Примитивный многочлен  $h(x)$  — это многочлен, для которого последовательность  $a_0, a_1, a_2, \dots$  имеет период  $2^n - 1$  (относительно некоторого начального состояния). Прием без доказательства, что для каждого  $n$  существуют примитивные многочлены степени  $n$ . В настоящее время получены и опубликованы выражения для примитивных многочленов  $h(x)$  до степени  $n = 40$ .

Для примера воспользуемся многочленом

$$h(x) = x^4 + x + 1,$$

у которого  $n = 4$ . Этому многочлену соответствует сдвиговый регистр с обратной связью, показанный на рис.5.4. В общем случае сдвиговый регистр состоит из  $n$  ячеек (триггеров или других запоминающих элементов), в данном случае  $n = 4$ . Каждая из ячеек может содержать 0 или 1. Одна из ячеек соответствует члену  $x^0 = 1$  многочлена. Все ячейки регистра включены последовательно друг другу. Обратная связь подается с выхода регистра на его вход. В обратной связи производится суммирование содержимого ячеек, номер которой равен показателю степени соответствующего члена многочлена. На рис.5.5 приведен сдвиговый регистр с обратной связью, соответствующий многочлену  $h(x) = x^3 + x^2 + x + 1$ .

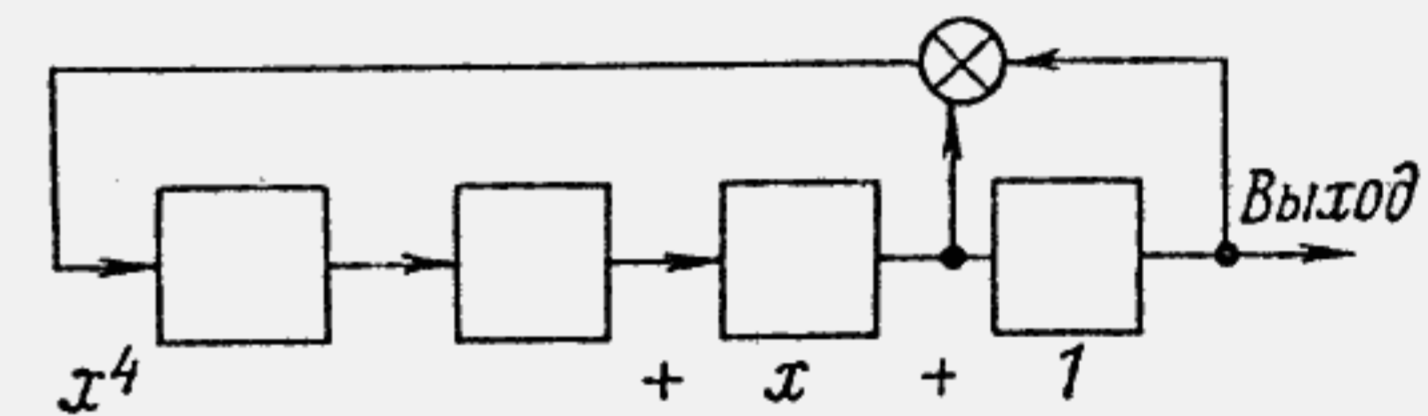


Рис.5.4

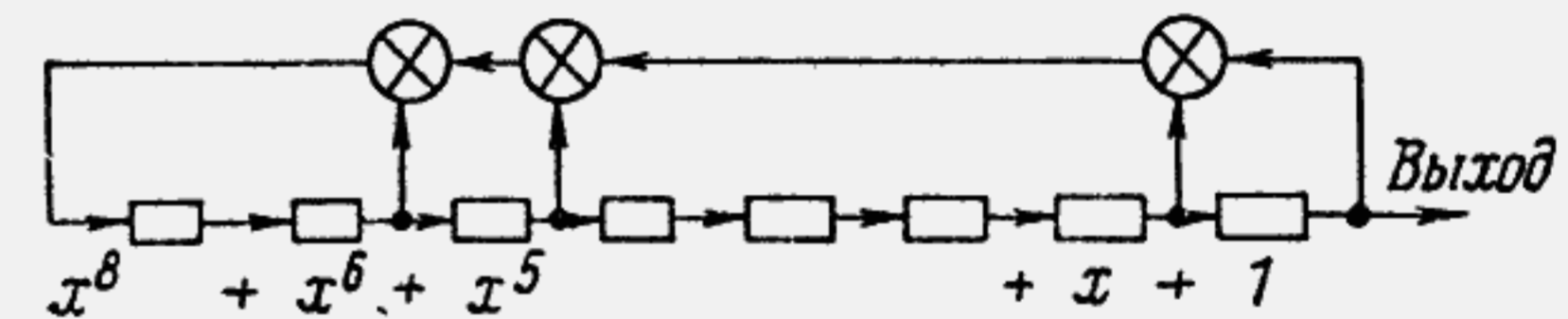


Рис.5.5

Приведенные схемы сдвиговых регистров с обратными связями представляют собой генераторы соответствующих псевдослучайных последовательностей. Схема (рис.5.4) работает следующим образом. В каждый момент времени, определяемый некоторой тактовой частотой, содержимое всех ячеек (триггеров) сдвигается на одну ячейку (разряд) вправо, причем содержимое ячеек, соответствующих членам многочлена  $h(x)$ , суммируется и поступает в крайнюю левую ячейку. Сумма вычисляется по модулю 2 так, что знак  $\otimes$  на рис.5.4 и 5.5 соответствует сумматору по модулю 2, или вентилю ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, выход которого определяется условиями  $0+0=1+1=0$  и  $0+1=1+0=1$ .

Так как каждая из  $n$  ячеек регистра содержит 0 или 1, то сдвиговый регистр может иметь  $2^n$  состояний, а это означает, что последовательность  $a_0, a_1, a_2, \dots$  должна быть периодической. Однако нулевое состояние возможно лишь в том случае, когда все







### 5.5. Процедура восстановления изображения

Хорошо известно, что изображение в камере-обскуре, как в классической однодырочной, так и в многодырочной, при некогерентном освещении может быть записано в виде свертки искомой функции  $f(x)$ , определяющей распределение интенсивности в плоскости объекта, и аппаратной функции  $A(x)$ , равной распределению коэффициента пропускания в плоскости "объектива"-маски:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(x') T(x-x') dx' \quad (5.2)$$

В этой формуле переменные  $X$  и  $X'$  могут означать векторные координаты в плоскости изображения и объекта, и в этом случае интеграл должен рассматриваться как двойной по плоскости объекта.

Для работы камеры необходимо, чтобы каждый элемент источника  $I$  проектировался на детектор 4 через участок маски 2, содержащий полный период ПС-последовательности, при этом возможны два вида расположения маски и детектора, представленные на рис. 5.10. В первом случае размеры тени маски 3 равны размерам базовой маски, а детектор имеет большие размеры; во втором случае тень маски 3 имеет размеры больше, чем размеры базовой маски, а размеры детектора соответствуют базовому размеру.

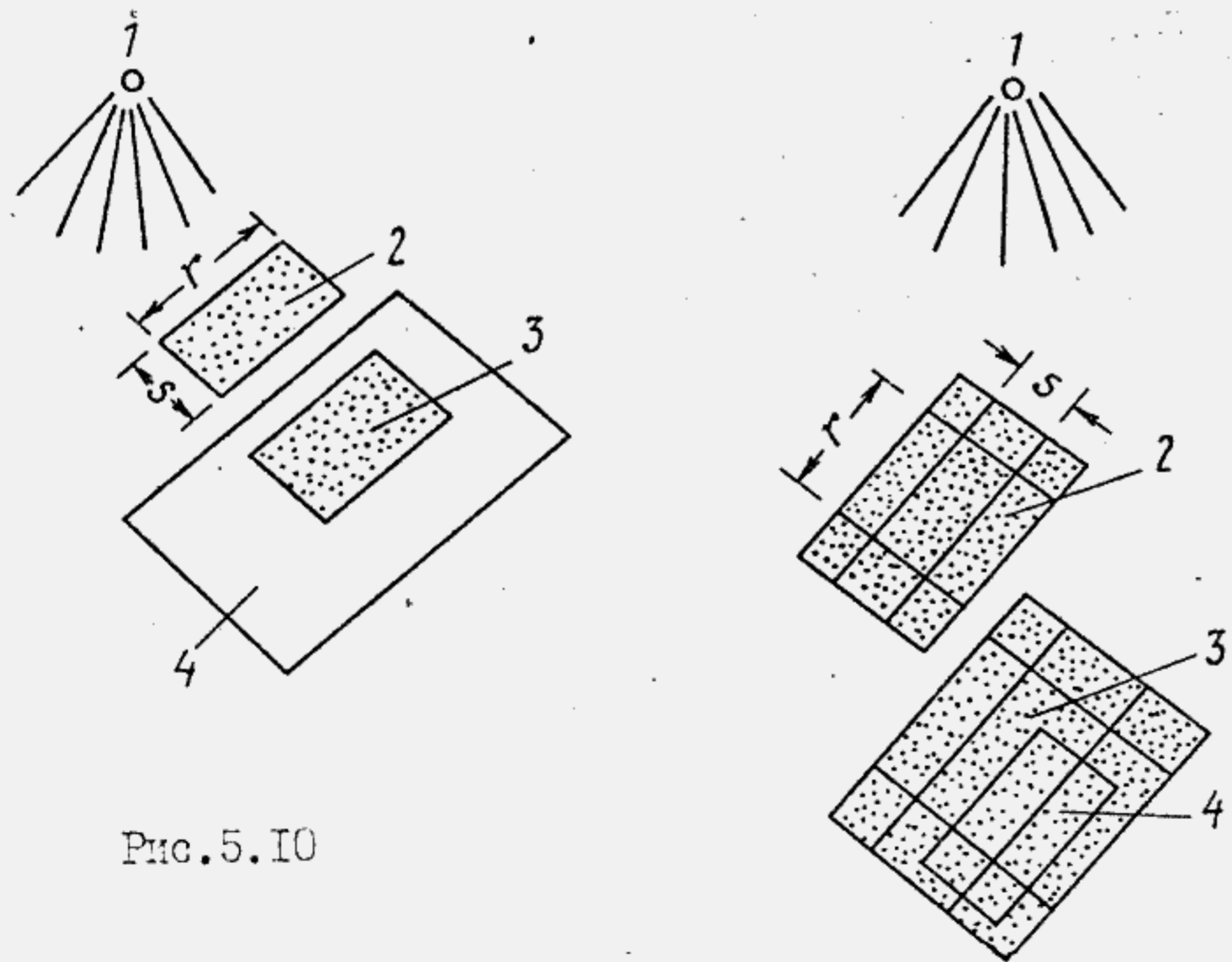


Рис. 5.10

В первом случае тень маски в общем случае может занимать любое место в пределах размеров детектора. Во втором случае детектор в общем случае регистрирует тень, состоящую из симметричных дополнений.

В качестве позиционно-чувствительного детектора могут применяться фотопленки, однако по целому ряду причин в реальных устройствах они не применяются (недостаточная чувствительность, быстрое насыщение, сложность с автоматизацией процесса обработки). По этим причинам для регистрации рентгеновской тени, создаваемой кодирующей маской, часто используют газовые пропорциональные счетчики.

Таким образом, основными компонентами систем получения изображений с кодирующими масками являются сама кодирующая маска, позиционно-чувствительный счетчик и ЭВМ для обработки данных. Маску помещают на определенном расстоянии перед детектором и наводят это устройство на исследуемый источник ионизирующего излучения. Падающее на детектор излучение регистрируется в соответствии с распределением тени, и если маска изготовлена правильно, то из полученной тени можно получить достаточно информации для воссоздания изображения источника с помощью ЭВМ.

Интересно отметить, устройство маска-детектор действует в некотором смысле как преломляющая линза, поскольку изменение расстояния между детектором и маской приводит к различным комбинациям разрешения поля зрения. Это устройство можно использовать и как телескоп для получения изображений удаленных рентгеновских и гамма-источников, и как камеру для построения близких объектов. В любом случае принцип регистрации одинаков. По существу, фокусировка систем изображения с кодирующими масками происходит уже после того, как изображение получено.

Одной из областей применения таких систем являются исследования в области управляемого термоядерного синтеза, когда изучается плазма, разогретая до чрезвычайно высоких температур. С помощью рентгеновского изображения можно анализировать размеры и форму сгустка плазмы и вариации ее температуры. Другая область применения - медицина. Указанные камеры могут регистрировать излучение гамма и рентгеновское от лекарственных препаратов, меченых радиоактивными элементами. Это позволяет следить, как данные препараты усваиваются и распределяются в организме после их введения.



Для рассмотренных ПС-масок процедура восстановления функции  $f$  по изображению  $P$  может быть записана в виде свертки для одномерной маски:

$$F(i) = \sum_{k=1}^P P(k) G(i+k). \quad (5.3)$$

Для двумерной маски аналогично

$$F(i, j) = \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^s P(k, l) G(k+l, l+j), \quad (5.4)$$

где  $i, j$  — дискретные координаты источника;  $k, l$  — дискретные координаты в плоскости детектора;  $G$  — восстанавливающая матрица. Функция  $G$  связана с функцией пропускания кодирующей маски соотношением:

$$G = \begin{cases} 1, & \text{если } T=1; \\ -1, & \text{если } T=0. \end{cases} \quad (5.5)$$

Таким образом, матрица  $G$  получается из кодирующей матрицы  $A$  заменой нулей на  $-1$ . Например, для простейшей матрицы (5.1)

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

матрица  $G$  имеет вид:

$$G = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (5.6)$$

Рассматриваемая процедура восстановления изображения источника ионизирующего излучения с кодирующей маской в общем случае реализуется по схеме, структура которой приведена на рис. 5.11.

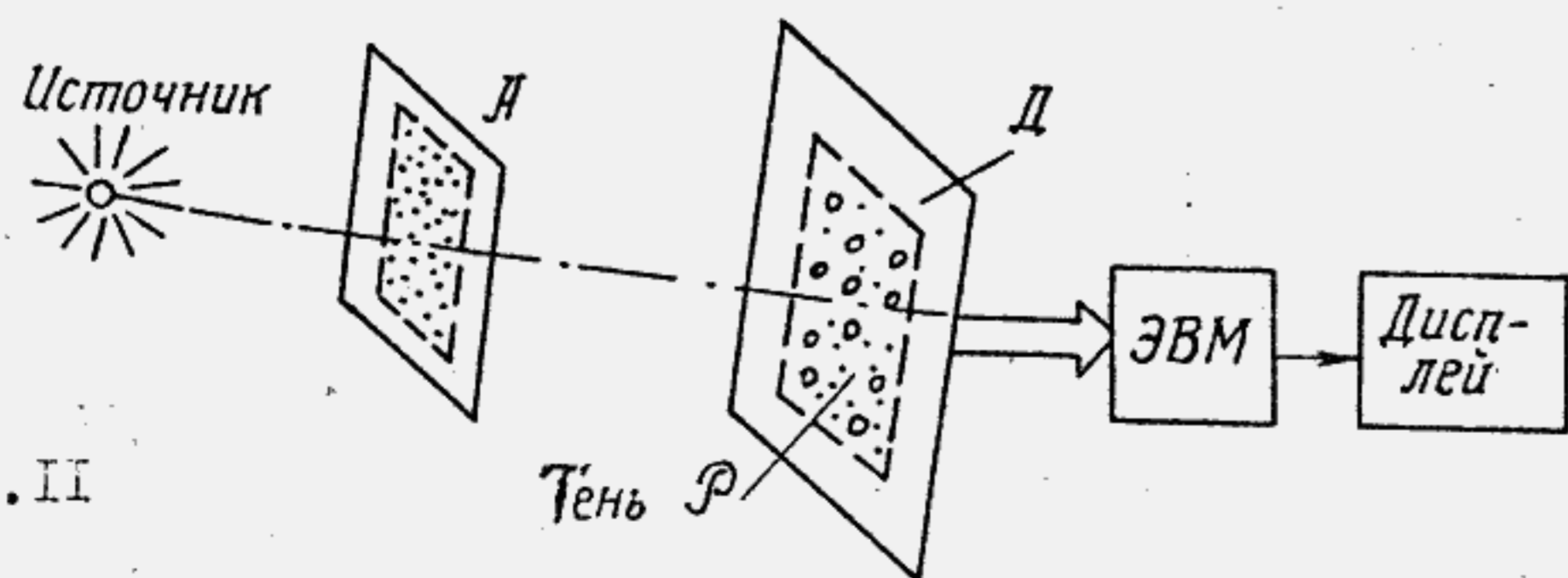


Рис. 5.11

Следует заметить, что отношение сигнал-шум в этой системе по сравнению с отношением сигнал-шум в обычной однодырочной камере-обскуре повышается в соответствии с числом отверстий  $N$  в ПС-маске

$$\rho_N = \sqrt{\frac{N}{2}} \rho_1.$$

## 5.6. Особенности построения системы регистрации с двумерными кодирующими масками

Позиционно-чувствительный детектор должен иметь разрешающую способность по координате лучшую, чем разрешающая способность маски. Так как тень маски сложного источника получается путем суперпозиции отдельных теней, создаваемых каждым пикселом, то детектор должен обладать относительно большим амплитудным динамическим диапазоном.

Как следует из рис. 5.11, каждый чувствительный элемент детектора должен быть соединен в пересчетной схеме и затем с ЗУ ЭВМ. Такое большое количество связей между элементами, с одной стороны, является источником низкой надежности, с другой стороны, ограничивает чувствительность чувствительных элементов мозаичного детектора из-за невозможности увеличить размеры чувствительных элементов при ограниченных габаритах детектора.

## 5.7. Система регистрации точечных источников ионизирующего излучения с одномерными кодирующими масками

Одномерные маски являются более простыми в изготовлении и более прочными по конструкции. Особенно существенно это при регистрации высокоэнергетичных квантов излучения, например гамма излучения, когда маски необходимо обрамлять свинцом. Конструкция маски становится непрочной, если встречаются фрагменты, когда группа или один непрозрачный элемент маски окружен отверстиями со всех сторон.

Одномерную маску изготавливают со щелями различной формы в виде квадратных отверстий и квадратных непрозрачных частей, круглых отверстий; наиболее предпочтительно изготавливать маску с отверстиями в виде продолговатых щелей и полос, непрозрачных для излучения.

Одномерные маски можно набирать из полос материала ("0") и оставлять щели между ними ("1"), а по концам полос крепить их к несущей рамке (рис. 5.12). Это позволяет использовать протяженные чувствительные элементы с повышением чувствительности за счет увеличения площади элементов по сравнению, например, с



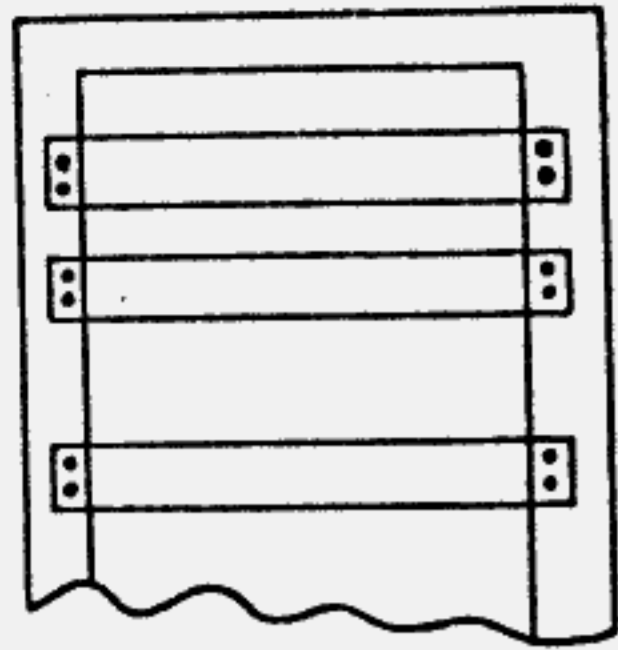


Рис. 5.12

квадратными элементами двумерного детектора. Можно использовать, например, в качестве чувствительных элементов газоразрядные счетчики Гейгера, хорошо освоенные нашей промышленностью и имеющие высокую чувствительность счета гамма-квантов, начиная от естественного фона.

Маску жестко закрепляют с детектором на расстоянии  $a$  от него таким образом, что образуется жесткая по конструкции пара маска-детектор

в виде некоторой линейки, так как геометрические размеры маски и детектора соответствуют друг другу.

Так, длину детектора выбирают в 1,5–2 раза больше длины маски, плоскость его параллельна плоскости маски.

Псевдослучайные последовательности для масок получают в соответствии с общими правилами, например, приведенными на рис. 5.4–5.6.

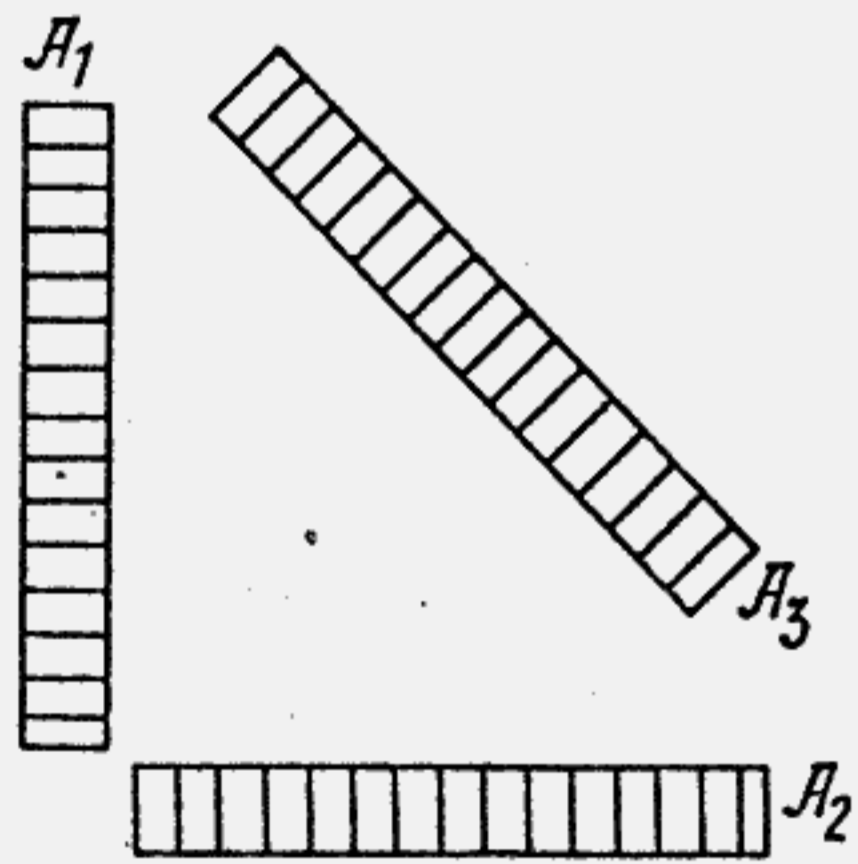


Рис. 5.13

Из трех линеек маска-детектор образуют систему, их располагают в одной плоскости в виде треугольника. В частности, рассмотрим случай, когда две линейки  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 5.13) располагают под прямым углом друг к другу так, что они образуют одну систему прямоугольных декартовых координат; третью линейку  $A_3$  располагают не под прямым углом к первым двум так, что  $A_3$  с любой из линеек  $A_1$  или  $A_2$  образует косоугольную систему координат.

Регистрация источника линейной одномерной парой маска-детектор осуществляется аналогично тому, как это происходит при двумерных маске и детекторе.

На детекторе получают изображение тени маски от нескольких точечных источников в виде последовательности  $P_k$ , после чего согласно выражениям (5.3) и (5.5) получают изображение источников.

Место расположения максимума в последовательности  $F$  отражает расположение проекции источника на ось линейки. На каждой из трех осей (линеек) проекция источника на данную ось определяется максимумом последовательности  $F$ .

По имеющимся проекциям источников на оси координат получают проекции источников на плоскости детекторов (плоскость изображения), что показано на рис. 5.14.

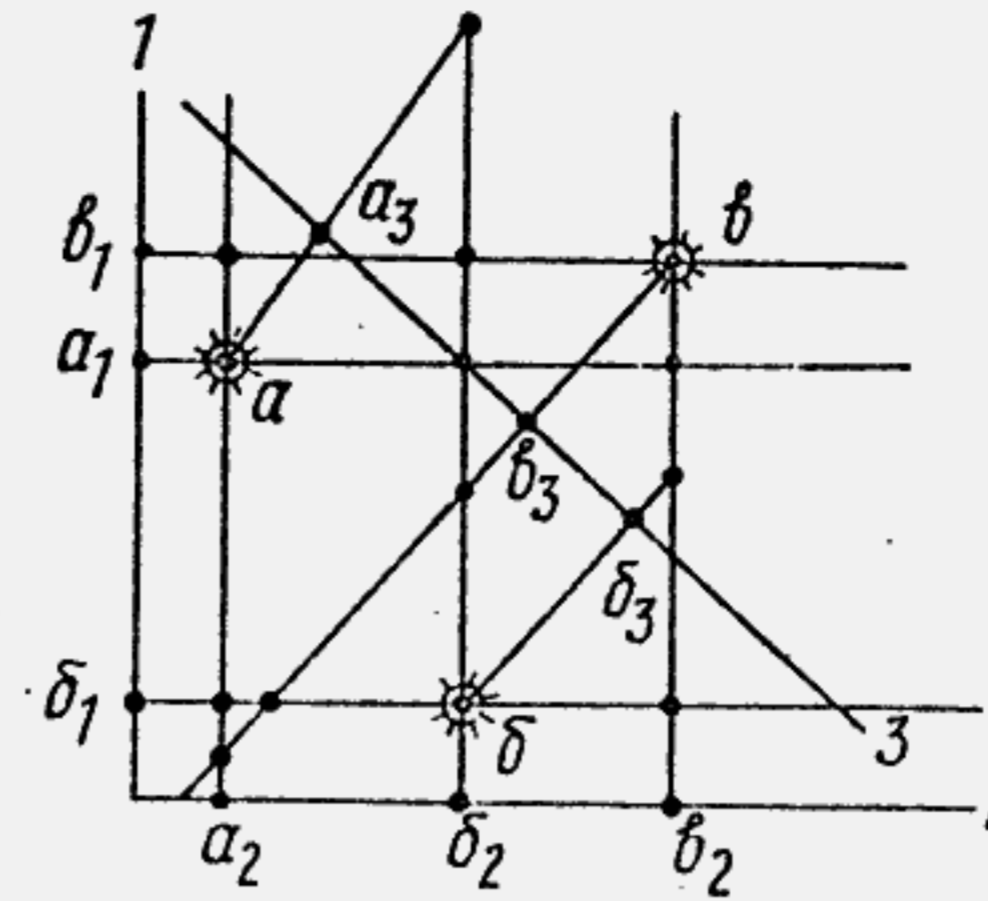


Рис. 5.14

Предположим, что регистрируется один точечный источник  $a$ , в этом случае достаточно иметь проекции  $a_1, a_2$  на двух осях 1 и 2. По пересечению перпендикуляров, восстановленных к осям 1 и 2 в точках  $a_1$  и  $a_2$ , однозначно находим расположение источника в плоскости изображения. Если регистрируются два источника  $a$  и  $b$ , то, пользуясь только осями 1 и 2, восстанавливая к ним по два перпендикуляра

соответственно в местах пересечения этих двух пар перпендикуляров, мы получим четыре точки пересечения вместо двух, т.е. получаются ложные источники. Для устранения этой неоднозначности используется третья ось 3. Восстанавливают в этом случае два перпендикуляра к оси 3 в точках  $a_3$  и  $b_3$ . Истинное положение источников в плоскости изображения находят в точках пересечения трех перпендикуляров к трем осям (см. рис. 5.14). Для нахождения расположения трех и более источников алгоритм определения по перпендикулярам, восстановленным к трем осям координат, остается прежним.

При некотором расположении источников относительно друг друга может оказаться, что происходит ложная регистрация источника, когда его нет; может быть и обратная ситуация, когда имеющийся источник не регистрируется, т.е. имеет пропуск источника.

Ложная регистрация и пропуск источников носит вероятностный характер, является случайным и зависит от расположения источников и расположения осей регистрации.

Рассмотрим рис. 5.15. На нем показана часть линейки пары маска-детектор, расположенной по оси  $x$  с точкой  $O$ , находящейся в центре маски-детектора. Точка  $f$  — максимум в последовательности  $F$ ;  $\Delta x$  — расстояние проекции точечного источника на ось  $x$  от центра линейки маска-детектор. Аналогично на линейке маска-детектор, расположенной по оси  $y$ , находится величина смещения проекции источника относительно центра  $\Delta y$ . Зная величины  $\Delta x, \Delta y, a$ , находят ~~и~~







изделии 5 по формуле

$$F_{mi} = \sum_{k=1}^P \rho_{mk} \delta_{m, k-i}, \quad m = 1, 2, 3..$$

В результате обработки получают последовательности (матрицы)  $F_{1,2,3}$ . Место расположения максимальных значений чисел в  $F_m$  определяет место расположения пресекций изображения источников на соответствующие оси координат, определяемые расположением линеек маска-детектор.

По полученным проекциям изображений источников вычислительное устройство 4 по программе 5 восстанавливает перпендикуляры к соответствующим осям в точках максимумов  $F_m$ , и по пересечениям трех перпендикуляров в одной точке определяется место расположения того или иного источника в плоскости изображений (плоскости детекторов). Затем вычислительное устройство по программе 5 определяет расстояние  $\Delta x$  и  $\Delta y$  максимумов  $F_m$  от центра детекторов и по ним вычисляет направляющие косинусы (5.7) углов между осями  $x, y, z$ , указывающими направление на тот или другой источник излучения из точки расположения источника в плоскости изображений (плоскости детекторов).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Харкевич А.А. Борьба с помехами. М.: ГИИИ, 1963, 275 с.
2. Тарасюк Ю.Ф., Серавин Г.И. Гидроакустическая телеметрия. М.: Судостроение, 1973, 176 с.
3. Родин Г. Сейсмология ядерных взрывов/ Перевод с английского. М.: Мир, 1974, 189 с.
4. Аппаратурные разработки для геофизических исследований электромагнитными методами/ Под ред. А.А. Сидорина. М.: Изд. АН СССР, 1986, 118 с.
5. Fenimore E.E., Cannon T.M. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays. *Applied Optics*, 1978, v. 17, N3, p. 337-347.
6. Макуильямс Ф.Д., Слоан Н.Д.А. Псевдослучайные последовательности и таблицы/ Русский перевод. ТИИЭР, 1976, т.64, № 12, с. 80-95.
7. Карабаджак Г.Ф., Кашлык А.В. и др. Многодырочная камера-обскуры для наблюдения слабого импульсного рентгеновского излучения. ПТЭ, 1988, № 2. с. 181-186.

#### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
I. Общие принципы построения многоканальных телеметрических систем .....	4
I.1. Телеметрические системы с частотным разделением каналов .....	4
I.2. Телеметрические системы с временным разделением каналов .....	6
I.3. Специфические потребности в телеметрических системах с частотным разделением каналов .....	9
I.4. Погрешность временной дискретизации измеряемых сигналов в телеметрических системах с временным разделением каналов .....	11
I.5. Помехи и помехоустойчивость телеметрических систем	16
I.6. Методы регистрации малых сигналов телеметрических систем при наличии помех .....	23
2. Линии передачи гидроакустической телеметрии .....	31
2.1. Гидроакустическая телеметрия .....	31
2.2. Условия распространения гидроакустических сигналов в морях и океанах .....	33
2.3. Распространение звука в слоисто-неоднородной среде	36
2.4. Фотонно-фонсный гидроканал .....	39
3. Дистанционная регистрация сейсмических сигналов подземных взрывов .....	40
3.1. Преобразование быстропротекающего процесса подземного ядерного взрыва в относительно медленный сейсмический сигнал .....	40
3.2. Деканнинг .....	42
3.3. Три типа упругих волн, используемых для обнаружения и идентификации взрыва .....	43
3.4. Влияние свободной поверхности .....	44
3.5. Сейсмический шум .....	45
3.6. Сейсмические приборы .....	46
4. Методы регистрации электромагнитных предвестников землетрясений .....	51
4.1. Физические процессы, ведущие к землетрясениям. Механизм возникновения предвестников землетрясения ....	51



4.2. Магнитуда сейсмических колебаний .....	54
4.3. Общие требования к прогностическим измерительным системам (сетям) .....	55
4.4. Виды измерений и предвестников, используемых для прогнозирования землетрясений .....	57
4.5. Электротеллурический метод .....	61
4.6. Электровариометрический метод .....	63
4.7. Метод напряженности электрического поля атмосферы .....	65
4.8. Метод магнитного поля Земли .....	68
4.9. Метод измерения импульсного электромагнитного излучения .....	71
4.10. Метод использования гидробионтов при регистрации электромагнитных предвестников землетрясений ...	72
5. Метод дистанционной регистрации источников ионизирующего излучения .....	73
5.1. Принципы получения изображения источников ионизирующего излучения .....	73
5.2. Камера-обскура .....	75
5.3. Многодырочные маски .....	77
5.4. Псевдослучайные последовательности, матрицы и маски .....	78
5.5. Процедура восстановления изображений .....	82
5.6. Особенности построения системы регистрации с двумерными кодирующими масками .....	85
5.7. Система регистрации точечных источников ионизирующего излучения с одномерными кодирующими масками .....	85
Литература .....	90

Редактор М.В.Макарова  
Техн. редактор Е.Н.Кочубей  
Корректор А.В.Цветкова

Тем. план 1991 г., вместо поз.7

Подписано в печать 21.01.92

Формат 60x84 1/16

Печ. л. 5,75 Уч. изд. л. 6

Тираж 110 экз.

Изд. № 074-1 Заказ 1574

Цена 35 коп.