

5199

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАДА

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13-5199



Ю.Ф. Барышев, А.М. Кучер, В.В. Миллер,
С.Г. Троицкий, Ю.С. Шимелевич

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
МОДЕЛИ ПЛАСТА С УРАНОВОЙ РУДОЙ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ

1970

13-5199

**Ю.Ф. Барышев, А.М. Кучер, В.В. Миллер,
С.Г. Троицкий, Ю.С. Шимелевич**

**ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
МОДЕЛИ ПЛАСТА С УРАНОВОЙ РУДОЙ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ СПЕКТРОМЕТРОМ**

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

В последние годы при изучении спектров гамма-излучения все большее применение находят спектрометры с полупроводниковыми $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторами (П.П.Д.). Высокое энергетическое разрешение и достаточно высокая эффективность регистрации гамма-квантов в широком диапазоне энергий выгодно отличают их от других типов спектрометров. С освоением серийного выпуска $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов (особенно детекторов большого объема) спектрометры с П.П.Д. будут безусловно широко внедряться как в практику физического эксперимента, так и в промышленность для решения различных прикладных задач.

Одной из областей возможного использования спектрометров с П.П.Д. является спектрометрия естественного и вызванного гамма-излучения при геофизических исследованиях для изучения элементного и изотопного состава горных пород.

Небольшие размеры самого П.П.Д. дают возможность при соответствующей конструкции криостата и усилителя использовать их в скважинных спектрометрах для проведения каротажа скважин на нефтяных и рудных месторождениях.

В настоящее время для этих целей используются сцинтилляционные спектрометры. Однако сложный характер спектров и большой фон рассеянного гамма-излучения приводят к тому, что применение сцинтилляционных спектрометров с их относительно низким энергетическим разрешением в ряде случаев не дает положительных результатов. С их помощью не удается надежно выделять отдельные линии спектра, особенно в мягкой ($E_\gamma < 1$ Мэв) области. Существенно лучшие результаты в этих условиях

Основные линии спектров гамма-излучения
естественных радиоактивных элементов.

могут быть получены с помощью спектрометров с П.П.Д., разрешение которых более чем на порядок выше, чем у сцинтилляционных спектрометров.

Одной из важных с точки зрения геологии и рудной геофизики задач является определение концентрации естественных радиоактивных элементов в горных породах. Спектры гамма-излучения, сопровождающего распад ряда природных радиоизотопов, имеют интенсивные линии (табл.1). Оценка интенсивности этих линий в спектре гамма-излучения горных пород в условиях естественного залегания позволит определять концентрацию соответствующих радиоизотопов.

Возможности сцинтилляционных спектрометров в этом отношении иллюстрируются рис. 1, заимствованном из работы /1/. Практически характер аппаратного спектра позволяет лишь выделять области, в которых преобладает гамма-излучение той или иной группы радиоизотопов. Оценка интенсивностей отдельных линий затруднительна, а при энергиях меньше 500 кэв они не проявляются вовсе.

Более детальный анализ спектров естественного гамма-излучения горных пород важен как с точки зрения прямого определения урана, радия ($E_\gamma < 200$ кэв) и других радиоактивных элементов, так и для надежного разделения гамма-излучения продуктов распада урана, тория и гамма-излучения K^{40} . Целью данной работы было исследование возможностей спектрометра с П.П.Д. для решения этой задачи.

Эксперимент

Измерения проводились на модели пласта с урановой рудой $x/$. Содержание урана в модели составляло 0,05% по весу. Вмещающей породой являлся кварцевый песок плотностью 1,6 г/см³. Размеры модели 400 x 400 x 500 мм. Детектор помещался в центре модели в цилиндрической скважине диаметром 100 мм. Стенки скважины изготовлены из дюрала толщиной 1 мм.

$x/$ Уран находится в радиоактивном равновесии с продуктами распада.

Изотоп	Энергия гамма-квантов, кэв	Интенсивность линии
1	2	3
<u>Ряд урана и актино-урана</u>		
выход в квантах на распад U^{238} .		
<u>А. Группа урана</u>		
Th^{234} (UX ₁)	62,8	0,043
U^{235}	91,4 185	0,044 0,0265
<u>Б. Радий</u>		
Ra^{226}	186	0,041
<u>В. Группа радона</u>		
Pb^{214} (RaB)	242	0,086
	295	0,215
	352	0,430
Bi^{214} (RaC)	609	0,535
	769	0,060
	935	0,037
	1120	0,15
	1238	0,069
	1764	0,19
<u>Ряд тория</u>		
выход в квантах на распад Th^{234}		
<u>А. Группа тория</u>		
Ac^{228} ($MsTh_2$)	908	0,250
	960	0,200
	1600	0,130
<u>Б. Группа торона</u>		
Pb^{212} (ThB)	238	0,465
Tl^{208} (ThC'')	583	0,300
	2614	0,353
<u>Калий</u>		
K^{40}	1460	выход в квантах на распад K^{40} 0,116

Таблица составлена по данным работ /3,4/

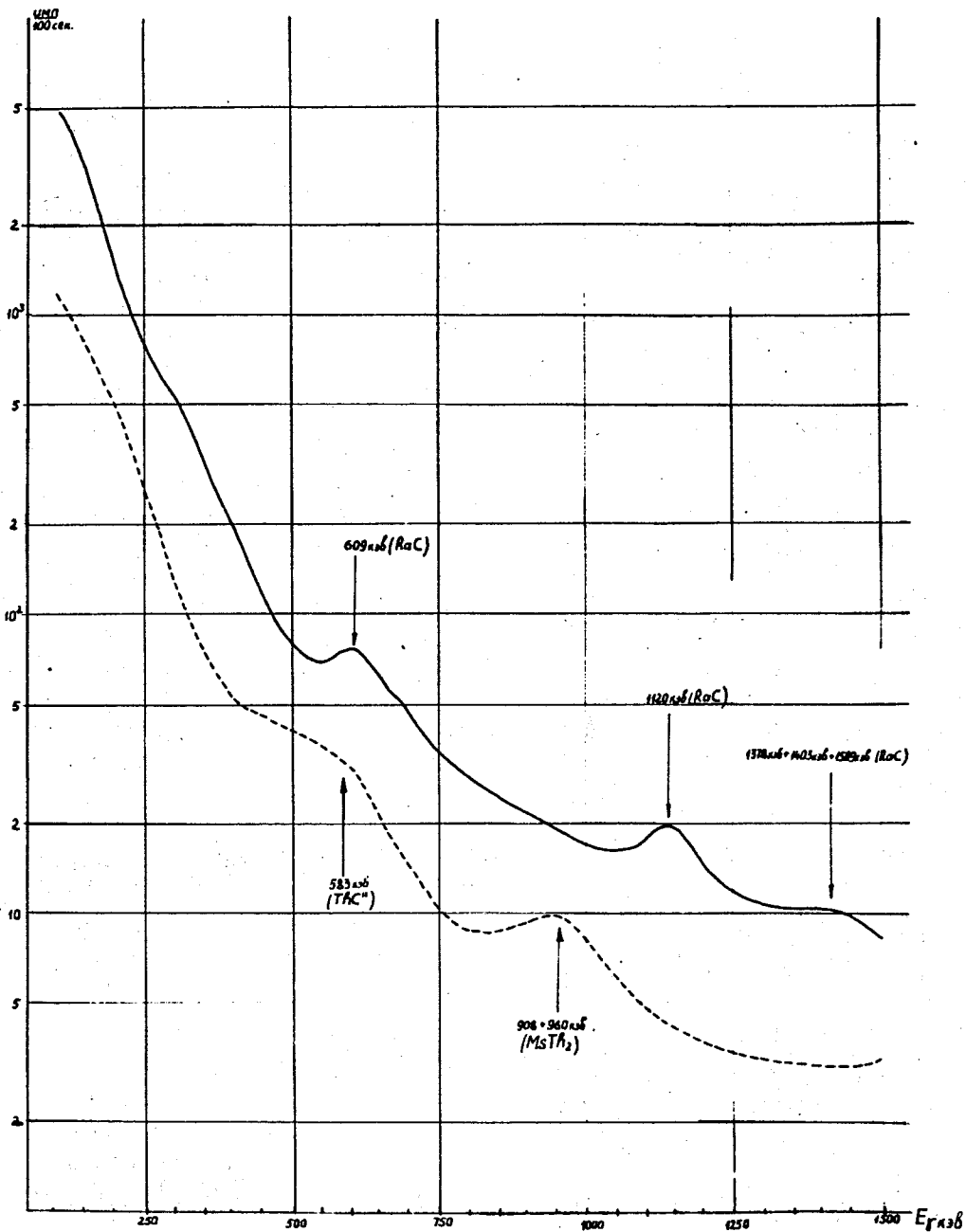


Рис. 1. Спектры гамма-излучения бесконечных пластов урановой и ториевой руд (модель)^{11/}. АИ-100-1, NaJ(Tl) 18x29 мм, — урановая руда, - - - ториевая руда.

щиной 1 мм. В отдельных измерениях между стенкой скважины и детектором помещалась стальная колонна, толщина стенки которой 5 мм.

Для измерений использовался спектрометр Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (рис. 2) с Ge(Li) -детектором объемом 3 см^3 . Предусилитель соединялся с детектором кабелем длиной 20 см, что несколько ухудшило разрешение спектрометра, однако, позволило поместить детектор в скважину. Импульсы с предусилителя, усиленные линейным усилителем, подавались по кабелю длиной 200 м на один из двух входных блоков 4096-канального анализатора - БАП-5 (число уровней преобразования 512) или МАРС-7 (число уровней преобразования 4096). Энергетическое разрешение спектрометра на линии ^{137}Cs (662 кэВ) составляло 6 кэВ.

На рис. 3 приведены типичные спектры гамма-излучения модели пласта, измеренные в скважине без стальной колонны и с ней. В обоих случаях на фоне непрерывного спектра рассеянного гамма-излучения четко выделяются пики, обусловленные наиболее интенсивными линиями в спектрах гамма-излучения ряда изотопов: ^{235}U - 185 кэВ; ^{226}Ra - 186 кэВ; $^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$ - 242 кэВ, 295 кэВ и 352 кэВ; $^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$ - 609 кэВ, 1120 кэВ, 1238 кэВ.

Была проведена оценка относительных интенсивностей линий спектра гамма-излучения модели.

Для этого определялись площади соответствующих фотопиков и вводилась поправка на зависимость эффективности детектора от энергии.

Эта зависимость (рис. 4) была найдена экспериментально. Эталонным источником служил препарат ^{226}Ra , находящийся в равновесии с продуктами распада.

Интенсивность линии считалась пропорциональной площади фотопика, деленной на величину эффективности детектора при данной энергии гамма-квантов.

Полученные величины относительных интенсивностей линий спектра гамма-излучения модели сравнивались с соответствующими значениями для первичного спектра урановой руды^{13,4/}. Результаты сравнения приведены на рис. 5.

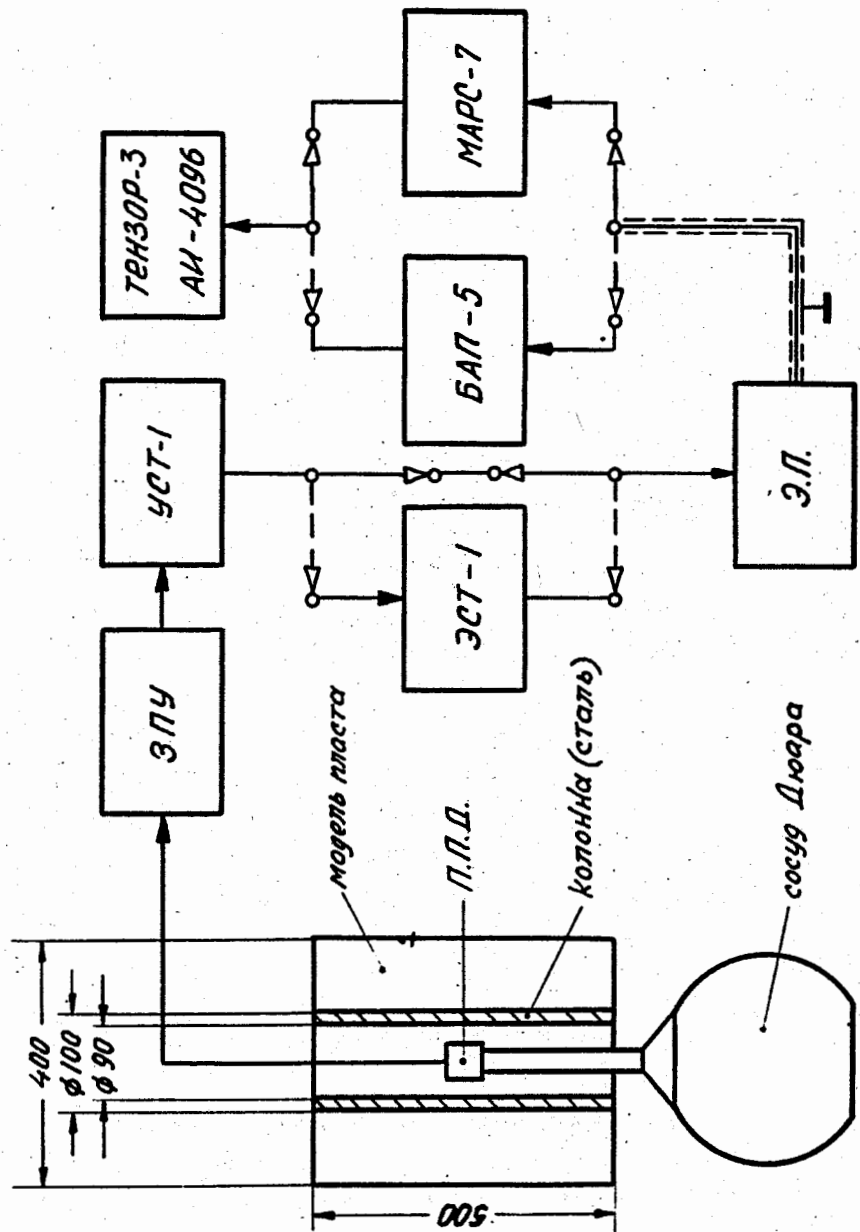


Рис. 2. Блок-схема установки. П.П.Д. - Ge(Li)гамма-детектор, $V = 3 \text{ см}^3$, Э.П.У. - зарядово-чувствительный предусилитель, У.С.Т. - линейный усилитель, Э.С.Т.-1 - экспандер, Э.П. - эмиттерный повторитель, Б.А.П.-5 - кодировщик (512 каналов), МАРС-7 - кодировщик (4096 каналов), Тензор-3 - 4096-канальный анализатор.

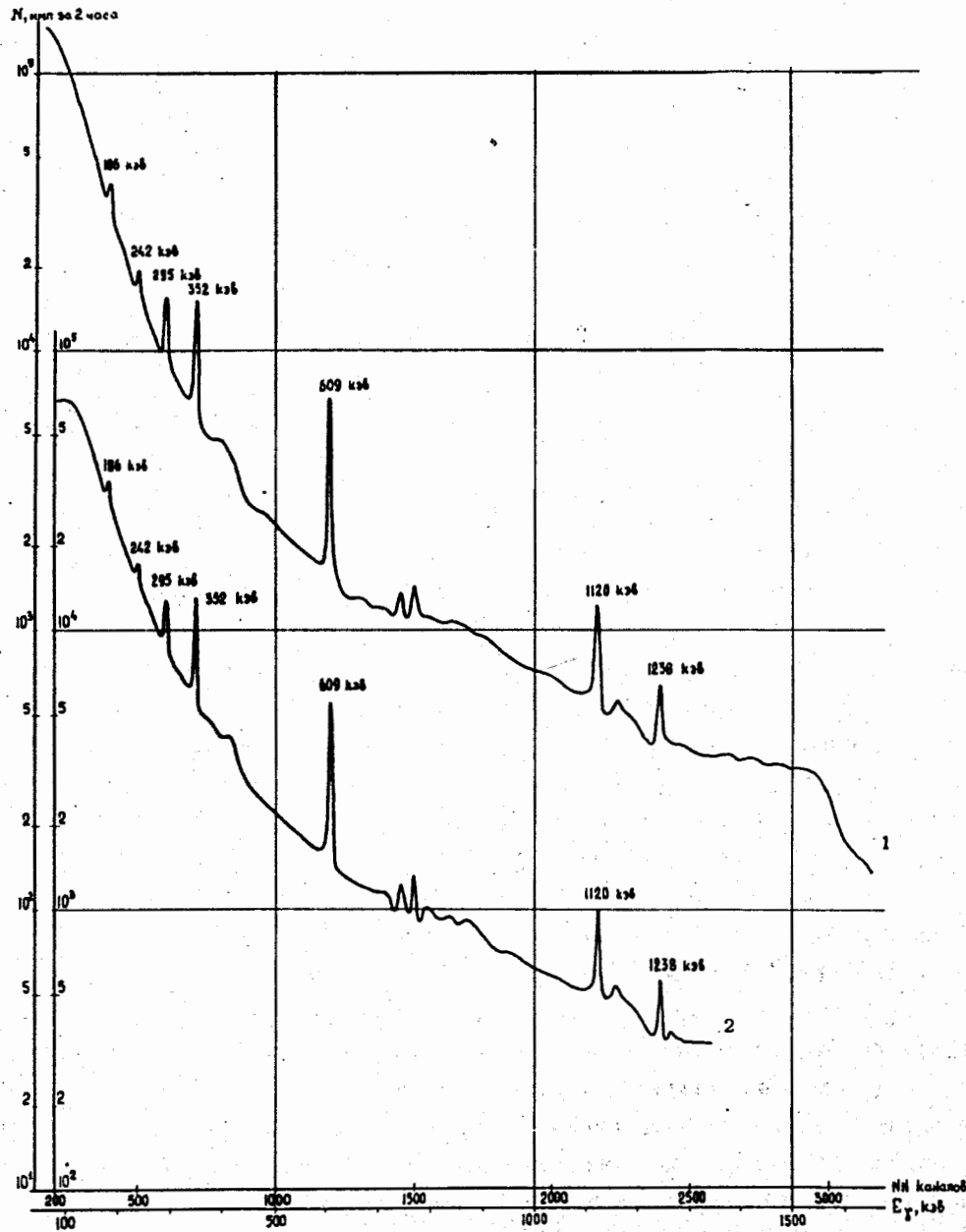


Рис. 3. Спектры гамма-излучения модели пласта с урановой рудой. $C(^{238}\text{U}) = 0,05\%$. 1 - измерения в скважине без колонны, 2 - - - - со стальной колонной, Ge(Li) - детектор, $V = 3 \text{ см}^3$, АИ-4096.

Влияние стальной колонны на характер спектра видно из рис. 6, где полученные значения интенсивностей линий спектров, измеренных через стальную колонну и без нее, сравниваются с расчетной кривой поглощения гамма-излучения в колонне. Экспериментальные точки располагаются вблизи расчетной кривой.

На этом же рисунке приведены величины отношений интенсивности непрерывного фона рассеянного гамма-излучения с колонной и без нее для разных участков спектра. Как видно из рисунка, это отношение остается практически постоянным в интервале 200–1300 кэВ и быстро уменьшается для $E_\gamma < 200$ кэВ.

Обсуждение результатов

Проведенные измерения показали, что спектрометр с $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектором позволяет выделять ряд линий в спектрах гамма-излучения естественной радиоактивности горных пород как в условиях обычной скважины, так и в скважине со стальной колонной. Так, в измеренном спектре модели пласта с урановой рудой четко выделяются пики, обусловленные гамма-излучением ^{235}U , ^{226}Ra , $^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$ и $^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$. Очевидно, при соответствующей концентрации тория и калия в породе можно будет с помощью такого спектра выделять линии гамма-излучения $^{228}\text{Ac}(\text{MsTh}_2)$, $^{212}\text{Pb}(\text{ThB})$, $^{208}\text{Tl}(\text{ThC}^{11})$ и K^{40} .

Это дает возможность надежно разделять гамма-излучение рядов урана, тория и калия в условиях скважины (или на других обнажениях пластов горных пород).

Характер аппаратного спектра позволяет оценивать относительную, а при соответствующей калибровке и абсолютную интенсивность линий спектра гамма-излучения, выходящего из пласта. Точность такой оценки зависит, конечно, от интенсивности линии и величины пьедестала под ней. Например, в наших измерениях площадь суммарного фотопика от линий 185 кэВ (^{235}U) и 186 кэВ (^{226}Ra) составляет 10% от площади пьедестала под ней. При двухчасовом замере на нашей установке набирается статистика, при которой ошибка определения площади этого пика составляет

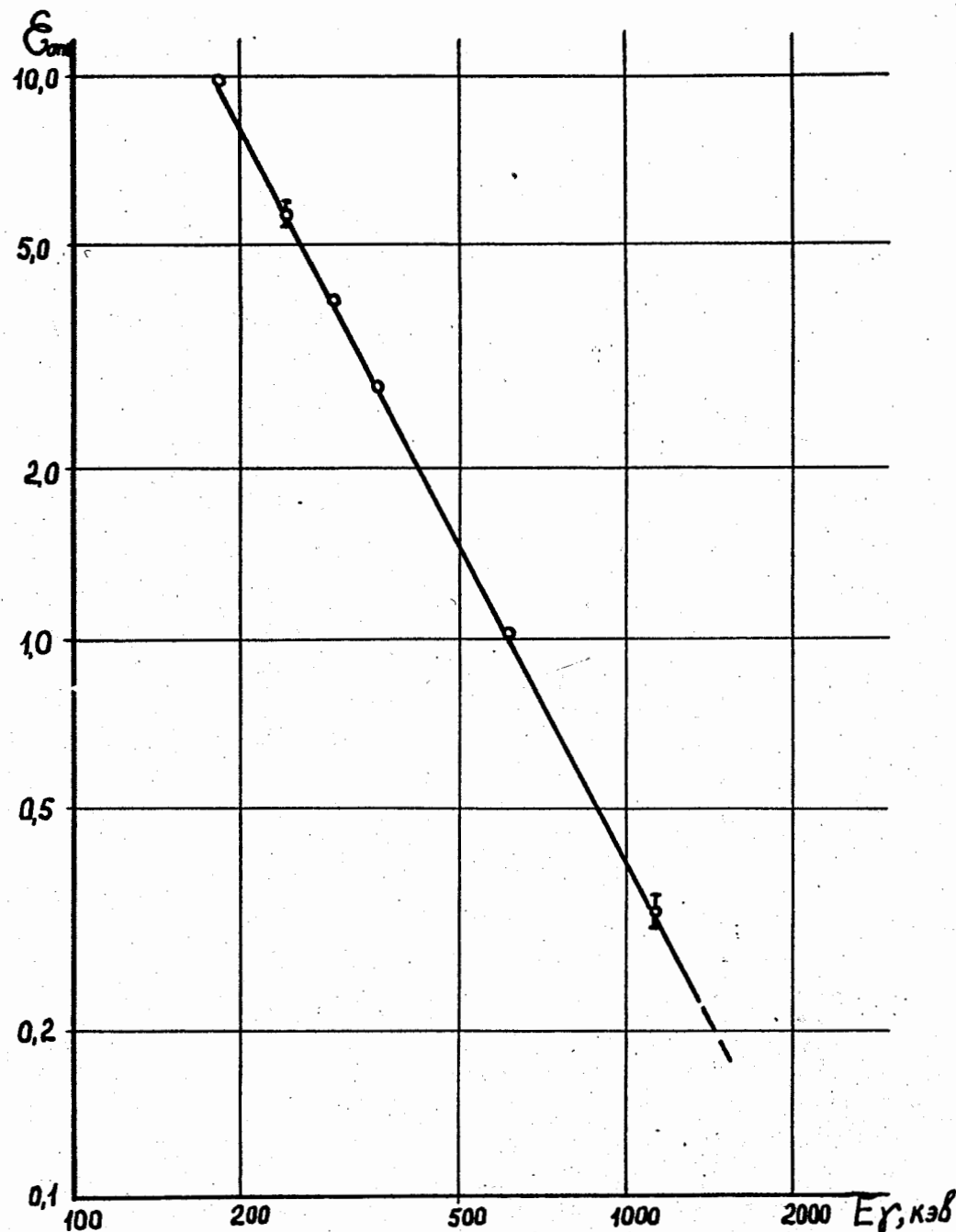


Рис. 4. Относительная эффективность $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора, $V = 3 \text{ см}^3$. Эталонный образец - ^{226}Ra в равновесии с продуктами распада.

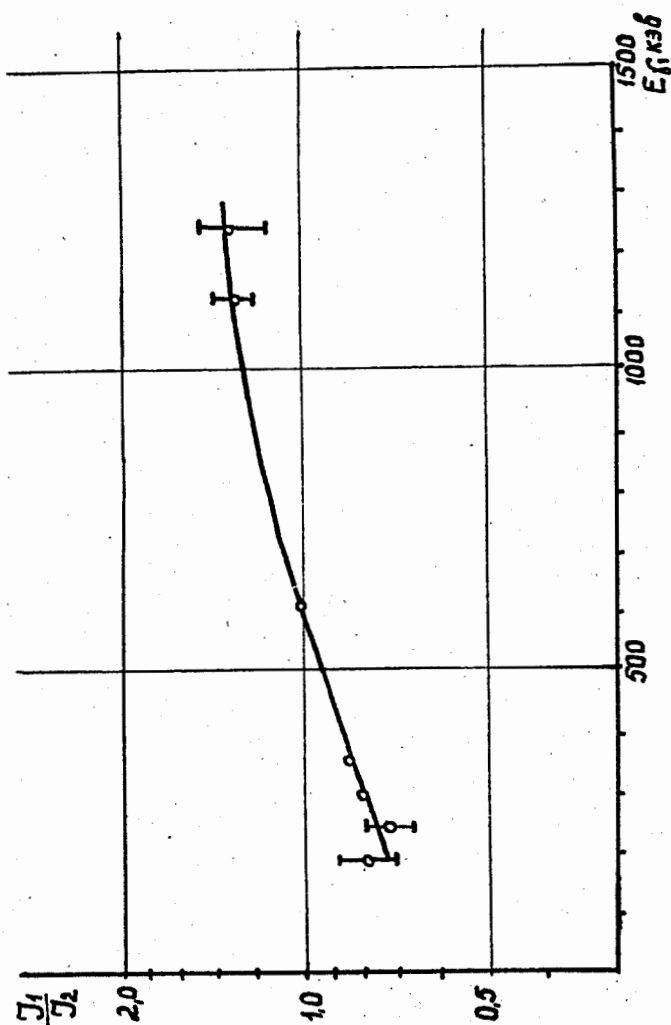


Рис. 5. Ослабление линий первичного спектра в модели пласта (измерение без колонны). J_1 - измеренная относительная интенсивность линии, J_2 - относительная интенсивность линии первичного спектра. Интенсивность линии 606 кэВ принята за единицу.

6% без колонны и 10% с ней. Для линии 609 кэВ (RaC) отношение площадей фотопика и пьедестала равно приблизительно 3. Ошибка в определении площади этого пика при тех же условиях составляет 2% (с колонной и без нее). Относительная интенсивность линий гамма-спектра модели пласта уменьшается с уменьшением энергии гамма-квантов по сравнению с соответствующими величинами для первичного спектра. Естественно, этот эффект зависит от свойств породы (ее плотности, элементного состава). Зная эти свойства, можно учитывать ослабление линий и восстанавливать первичную форму спектра. С другой стороны, по характеру ослабления линий спектра можно оценивать поглощающие свойства породы, которые связаны, в частности, с концентрацией в ней тяжелых элементов. Кроме этого, интересна возможность определения наличия радона в скважине без трубы по относительной интенсивности линий продуктов его распада (RaB и RaC). В отличие от спектра породы в этом случае относительная интенсивность линий будет соответствовать первичному спектру.

Ослабление линий спектра стальной колонной происходит в соответствии с кривой поглощения гамма-излучения по закону $e^{-\mu d}$ (d - толщина стенки колонны). Введение в скважину обсадной стальной колонны не меняет форму непрерывного спектра рассеянного гамма-излучения в интервале 200-1300 кэВ $x/$.

Кривую ослабления линий спектра можно построить на основании определения относительных интенсивностей линий для одного изотопа или для нескольких изотопов, соотношение в концентрации которых известно (например, по линиям RaB и RaC). Экстраполируя эту кривую на другие энергии, можно определить ослабление остальных линий спектра. Это дает возможность восстановить первичную форму спектра (для основных линий) непосредственно по результатам измерений и определить концентрацию соответствующих изотопов в породе.

Естественно, что круг задач, которые можно будет решать с помощью спектрометра с $Ge(Li)$ -детектором, зависит от его чувствительности, связанной с объемом детектора. Однако даже такой сравнительно

$x/$ Нужно отметить, что измерения проводились на модели, размеры которой меньше слоя полного насыщения. Для "бесконечного" пласта фон рассеянного гамма-излучения будет несколько выше.

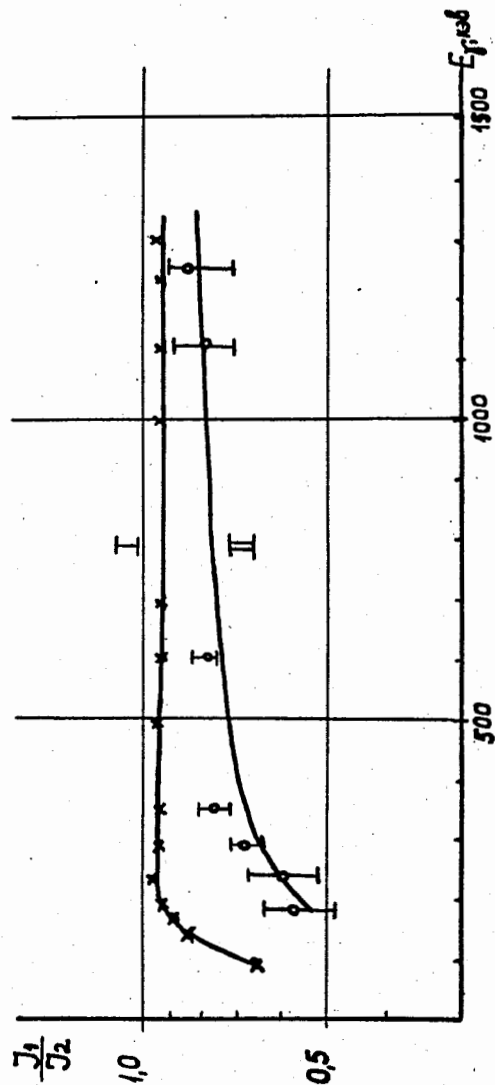


Рис. 6. Ослабление гамма-излучения стальной колонной. 1. Отношение интенсивностей рассеянного гамма-излучения. J_1 - интенсивность с колонной, J_2 - интенсивность без колонны. 2. Отношение интенсивностей спектральных линий. J_1 - интенсивность с колонной, J_2 - без колонны. Сплошная кривая 2-расчет, \circ - μ^d , точки - эксперимент.

небольшой детектор, который использовался в наших измерениях, позволяет делать количественные выводы относительно структуры спектра гамма-излучения пласта при довольно низкой концентрации урановой руды (0,05%).

Важным моментом является возможность определения концентрации урана в породе по интенсивности его собственных гамма-линий т.к. для косвенного определения его интенсивности по интенсивности гамма-излучения RaB и RaC необходимо, чтобы уран находился в равновесии с продуктами распада. Проведенные измерения показывают, что в случае, когда ^{226}Ra находится в равновесии с RaB и RaC и его концентрацию в породе можно определить по интенсивности линий этих изотопов, возможна оценка концентрации в породе урана независимо от состояния равновесия между ураном и радием по интенсивности линии 185 кэВ. Эта интенсивность определяется после вычитания вклада гамма-излучения радия в суммарный пик от линий 185 кэВ (^{235}U) и 186 кэВ (^{226}Ra). Когда уран находится в равновесии с радием, вклад урана в этот пик составляет 39%. Если суммарная интенсивность гамма-излучения ^{235}U и ^{226}Ra определена с точностью 10%, то интенсивность линии 185 кэВ (^{235}U), а, следовательно, и концентрация урана определяется с точностью $\approx 25\%$.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Н. Флерову, В.Л. Шашкину за полезные обсуждения, Ю.Э. Пенюонжкевичу за консультации по поводу работы с полупроводниковым спектрометром, а также О.А. Нечаеву, О.Я. Соболеву, Л.Д. Никулиной, Л.М. Деконской за участие в проведении экспериментов и оформлении работы.

Л и т е р а т у р а

1. С.Г. Троицкий, В.Л. Шашкин, К.И. Быкова. АЭ, т.12, вып. 1, 1962.
2. Б.А. Гвоздев, С.А. Карамян, Н.С. Мальцева, Ю.Ц. Оганесян, Ю.Э. Пенюонжкевич, А.М. Сухов, Б.В. Фефилов, З. Шегловский. Препринт ОИЯИ, 13-3771, Дубна, 1968.
3. С.М. Lederer, J.M. Hollander, I. Perlman. Table of Isotopes. New York, 1967.

4. Б.М. Сабиров, Я.Я. Урбанец, К.Я. Громов. Препринт ОИЯИ, 6-4372,
Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел

22 июня 1970 года.