

Экспериментальное исследование метода обнаружения взрывчатых веществ, основанного на регистрации рассеянного γ -излучения с использованием изотопа ^{137}Cs

В. М. КИРИЛЛОВ, М. В. АЛЕКСЕЕВ

Проведены измерения спектров γ -излучения, рассеянного тротилом и близкими ему по плотности и составу веществами, расположенными за различными защитами. Изложены экспериментальные результаты проверки возможности технической реализации γ -томографии для обнаружения и идентификации взрывчатых веществ.

Ключевые слова: тротил, обнаружение, спектры, рассеянное γ -излучение.

The measurements of γ -radiation spectrums diffused by trinitrotoluene and close to it on density and content substances located behind various shields are carried out. The experimental results of checking an opportunity of technical realization of γ -tomography for detection and identification of explosive substances are shown.

Key words: trinitrotoluene, detection, spectrums, diffused γ -radiation.

Методам обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) в последнее время уделяется довольно пристальное внимание в научно-технической литературе. Проведем эксперименталь-

ные исследования ядерно-физического метода контроля ВВ, основанного на анализе спектра γ -излучения, отраженного от облучаемого объекта. Этот метод приобретает особую

важность при одностороннем доступе к инспектируемому объекту, когда исключена возможность установки детекторов с противоположной стороны для регистрации прямого излучения источника. Новизна и практическая значимость проведенных измерений заключаются не только в исследовании спектров ВВ, в том числе тех, которые расположены за различными защитами, исключающими обнаружение по анализу газовых испарений ВВ, но и в экспериментальной проверке возможности технической реализации нового метода идентификации ВВ — γ - γ -томографии. Метод γ - γ -томографии заключается в следующем: весь объем исследуемого вещества разбивается на множество элементарных ячеек, в пределах которых плотность и эффективный атомный номер считаются постоянными и рассчитываются на основе экспериментальных данных о плотности и эффективном атомном номере всего объема вещества, полученных и обработанных с помощью алгоритмов компьютерной томографии несколькими детекторами, расположенными вокруг объекта вдоль разных лучей — траекторий γ -квантов.

Из прикладной ядерной геофизики известно, что алгоритмы реконструктивной томографии могут быть реализованы в том случае, если исследуемые параметры (плотность и эффективный атомный номер) являются интегралами затухания, т. е. непрерывными, гладкими убывающими функциями в зависимости от длины луча — линии, аппроксимирующей путь γ -кванта от источника до данного детектора.

Чтобы обосновать возможность применения алгоритмов реконструктивной томографии в плотностном и селективном γ - γ -анализе при контроле наличия ВВ, необходимо было экспериментально решить следующие задачи:

во-первых, показать в соответствующей геометрии природных измерений преобладание однократно рассеянных квантов в общем спектре жестко коллимированного γ -излучения при облучении объектов, содержащих ВВ или вещества с близкими к ним физико-химическими свойствами. При этом условии весь пучок регистрируемых детектором γ -квантов аппроксимируется одной ломаной линией (лучом);

во-вторых, на основе обработки экспериментальных данных получить зависимость интенсивности регистрируемого γ -излучения в различных энергетических диапазонах от интегральных физико-химических параметров: плотности (ρ) и эффективного атомного номера ($Z_{эфф}$) всего облучаемого объема вещества и проверить возможность их однозначного определения за реальное для практики полевых измерений время экспозиции;

в-третьих, исследовать зависимость интенсивности регистрируемого γ -излучения от длины луча и угла между направлениями осей коллиматоров источника и детектора (угла рассеяния однократно рассеянного излучения).

Основная цель измерений заключалась в выявлении спектральных закономерностей распределения рассеянного γ -излучения в зависимости от физико-химических параметров облучаемых объектов применительно к натурным условиям проверки наличия в них ВВ, а также экспериментальной проверке достоверности разработанных алгоритмов расчета переноса излучения в веществе [1, 2].

Геометрия измерений. Эксперимент проводился на базе оборудования Московского инженерно-физического института (Технического университета). В качестве источника зондирующего γ -излучения использовался изотоп ^{137}Cs (662 кэВ) мощностью 0,5 Ки. Источник окружен свинцовой шарообразной защитой радиусом 250 мм с коллимационным окном в форме цилиндрического отверстия диаметром 10 мм (выход коллиматора источника $5 \cdot 10^9$ квант/с). Сцинтилляционный детектор собран на кристалле $\text{NaI}(\text{Tl})$ и заключен в свинцовый цилиндрический коллиматор диаметром 150 мм с окном диаметром 15 мм и длиной 200 мм. Источник был

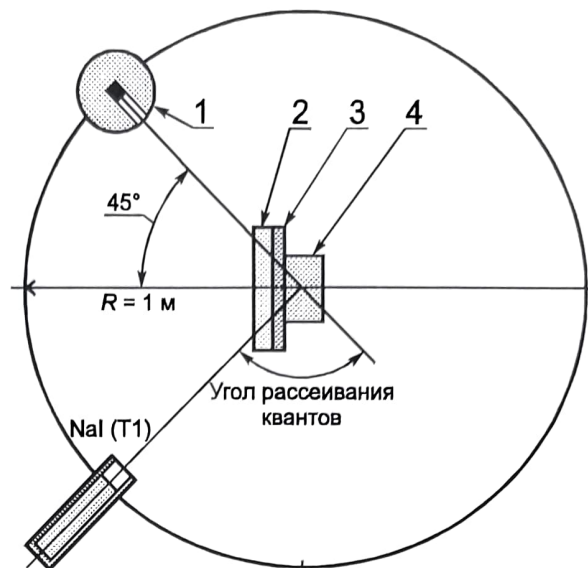


Рис. 1. Основная геометрия измерений

постоянно закреплен, а детектор мог вращаться вокруг неподвижной оси таким образом, что коллиматоры источника и детектора фокусируются в точке центра вращения и лежат в плоскости, перпендикулярной оси вращения детектора (рис. 1). Радиус вращения детектора и расстояние от источника до оси вращения фиксированы и равны 1 м. Облучаемый объект устанавливали в центре симметрии данной системы так, что угол между нормалью к его поверхности и осью коллиматора источника составлял 45° . Ось коллиматора детектора составляла с осью коллиматора источника углы 60, 75, 90, 105, 115, 120°, равные углу рассеяния первичного кванта источника. Такая ориентация детектора обеспечивает наиболее эффективную регистрацию однократно рассеянного γ -излучения. Точка фокусировки коллиматоров источника и детектора находилась внутри исследуемых образцов на глубине от лицевой поверхности около 25 мм.

Объекты облучения (отражатели) представляют собой бруски размером $50 \times 50 \times 100$ мм, изготовленные из различных материалов, а именно: полиэтилена ($\rho = 0,93$ г/см³, $Z_{эфф} = 5,61$), мыла ($\rho = 1,22$ г/см³, $Z_{эфф} = 6,95$), графита ($\rho = 1,72$ г/см³, $Z_{эфф} = 6$), алюминия ($\rho = 2,75$ г/см³, $Z_{эфф} = 13$). В эксперименте использовали в качестве ВВ две тротильовые шашки ($\rho = 1,6$ г/см³, $Z_{эфф} = 7,05$) размером $25 \times 50 \times 100$ мм каждая.

Эффективный атомный номер сложных веществ можно рассчитать по формуле

$$Z_{эфф} = \left(\sum_{i=1}^N p_i Z_i^{2,3} \right)^{1/2,3},$$

где p_i — массовая доля i -го компонента в веществе; Z_i — эффективный атомный номер i -го компонента [3]. Экспериментально, по виду спектров, т. е. по соотношению сигнал—шум, было установлено, что для достижения желаемого по точности результата следует выбрать время экспозиции не менее 9000 с на одно измерение. Тогда статистика измерений позволила в данной геометрии получить достаточно гладкий энергетический спектр для всех облучаемых веществ.

Для экспериментальной проверки достоверности алгоритмов расчета взаимодействия и переноса γ -излучения для контроля объектов при одностороннем доступе к ним, изло-

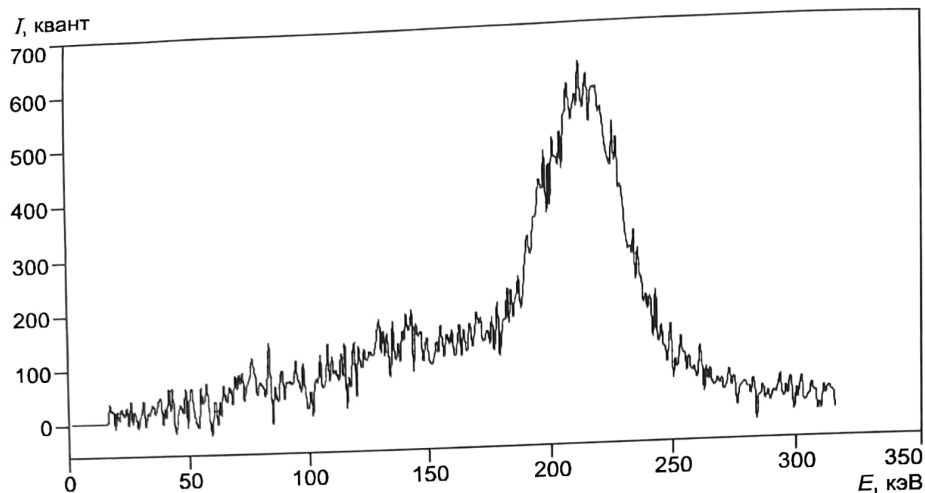


Рис. 2. Энергетический спектр γ -излучения, рассеянного тротилом, в основной геометрии без защиты под углом 120°

женных в [1, 2], измерения проводились также в геометрии, условно названной «малой». В «малой» геометрии источник и детектор располагались на расстоянии 50 мм от исследуемого объекта. В некоторых экспериментах для достижения оптимальной зависимости интенсивности рассеянного γ -излучения от плотности вещества в этот промежуток между исследуемым объектом и прибором-зондом помещают слой полиэтилена толщиной 50 мм (фильтр). Установ-

ка фильтра искусственно повышает эффективный атомный номер ВВ, создавая условия для их обнаружения в селективном γ -методе, который эффективно работает в ядерной геофизике только при разведке пород с $Z_{эфф}$ не менее 10. Кроме того проводили также и измерения в полубесконечной геометрии, когда облучали сборки из алюминия и полиэтилена с геометрическими размерами, значительно превышающими свободный пробег квантов с энергией 662 кэВ в этих материалах.

Измерения в основной геометрии. Вид спектров, полученных экспериментально, когда расстояние от источника (детектора) до отражателя равнялось 1 м (основная геометрия), показан на рис. 2. На рисунке приведены результаты измерений только для угла рассеяния 120° . Для анализа спектров были выделены три интервала энергий с одинаковой шириной 80 кэВ и в каждом из

них подсчитывали количество зарегистрированных квантов (площадь спектра данного интервала): I_1 — площадь спектра в интервале энергий 16—96 кэВ (первый нечеткий максимум), I_2 — от 63 до 143 кэВ (второй, более выраженный максимум), I_3 — площадь явно заметного пика энергии однократно рассеянного γ -излучения. Первые два интервала соответствуют многократному рассеянию, и их границы не зависят от угла рассеяния квантов в отличие от границ

Таблица 1

Параметры рассеянного γ -излучения без защиты

Угол рассеяния, град	Материал отражателя	Плотность	$Z_{эфф}$	I_1		I_2		I_3		I_3 / I_1	I_3 / I_2
				с фоном	без фона	с фоном	без фона	с фоном	без фона		
60	Полиэтилен	0,93	5,61	31708	6465	43645	11932	48379	35254	5,65	3,05
	Мыло	1,22	6,95	33141	7898	44777	13064	49982	37254	4,79	2,9
	Графит	1,72	6	35076	9833	47637	15924	53305	40484	4,16	2,54
	Алюминий	2,75	13	35730	10487	49779	18066	55678	43761	4,2	2,44
75	Полиэтилен	0,93	5,61	32716	7473	45362	13649	47541	31636	4,41	2,41
	Мыло	1,22	6,95	33403	8160	46362	14612	49748	33704	4,31	2,4
	Графит	1,72	6	36043	10800	50568	18855	54533	38281	3,62	2,07
	Алюминий	2,75	13	36755	11512	52550	20837	57690	41644	3,74	2,07
90	Полиэтилен	0,93	5,61	28927	3684	40606	8893	48345	29665	8,44	3,5
	Мыло	1,22	6,95	29670	4427	41740	10027	49870	31462	7,43	3,28
	Графит	1,72	6	32270	7027	46413	14700	54223	35914	5,33	2,49
	Алюминий	2,75	13	32922	7679	49089	17376	53975	39500	4,8	2,12
105	Полиэтилен	0,93	5,61	28437	3194	39636	7923	49678	28741	9,37	3,78
	Мыло	1,22	6,95	29052	3809	40514	8801	51652	30566	8,36	3,62
	Тротил	1,6	7,05	29035	3792	40964	9251	52077	33696	8,47	3,47
	Графит	1,72	6	31051	5808	44653	12940	55029	34718	5,83	2,84
Алюминий	2,75	13	32550	7307	47854	16141	56820	38650	5,07	2,3	
115	Полиэтилен	0,93	5,61	28627	3384	39274	7561	51631	28757	8,92	3,99
	Мыло	1,22	6,95	28762	3519	40043	8350	50893	29823	8,31	3,5
	Графит	1,72	6	30269	5026	43207	11494	56130	32529	6,84	2,99
	Алюминий	2,75	13	32586	7343	48234	16521	64803	41519	5,91	2,63
120	Полиэтилен	0,93	5,61	28066	2823	38878	7165	53292	29398	10,99	4,33
	Мыло	1,22	6,95	28745	3502	39762	8049	52240	30657	8,62	3,75
	Тротил	1,6	7,05	29245	4002	40508	8795	55438	35065	8,35	3,8
	Графит	1,72	6	30871	5628	43545	11822	60032	36165	6,76	3,22
Алюминий	2,75	13	32734	7491	46380	14667	64454	40451	5,64	2,88	

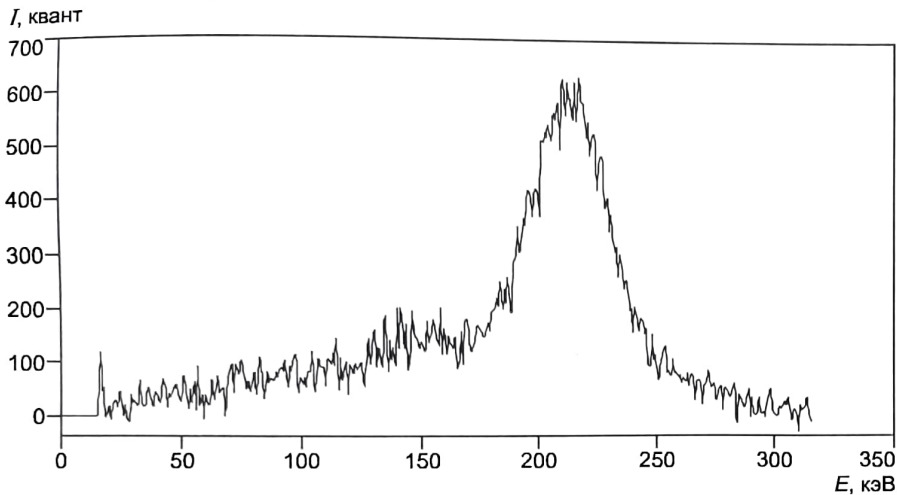


Рис. 3. Энергетический спектр γ -излучения, рассеянного тротилом, в основной геометрии с защитой из стали под углом 120°

пика однократного рассеяния, которые устанавливали для средней энергии однократного рассеяния, определяемой по формуле

$$k' = k / [1 + k(1 - \cos \theta)],$$

где k и k' — комптоновские энергии первичного и рассеянного квантов; θ — угол рассеяния.

Так, для угла рассеяния 60° энергетический диапазон пика однократного рассеяния лежит в пределах от 342 до

422 кэВ, для угла 75° — от 278 до 358 кэВ, для 90° — от 228 до 308 кэВ, для 105° — от 182 до 262 кэВ, для 115° — от 178 до 258 кэВ, для 120° — от 173 до 253 кэВ.

Из табл. 1 видно, что в спектре отраженного (рассеянного) излучения в данной геометрии измерений явно доминирует однократно рассеянная составляющая при всех положениях детектора. Следовательно, весь пучок траекторий квантов, регистрируемых детектором, можно, как это требуется в γ -томографии, аппроксимировать ломаной линией, соответствующей пути однократно рассеянного кванта. Причем максимальный эффект регистрации однократно рассеянного излучения (наибольшие значения I_3/I_1 и I_3/I_2) наблюдали при углах рассеяния 105 — 120° , что соответствует теоретическим выводам об оптимальной геометрии зонда [2]. Результаты измерений именно для этих углов приведены ниже.

В качестве идентификационного признака наличия ВВ можно, в принципе, предложить как отношение площади пика однократного рассеяния к первому (I_3/I_1) или второму (I_3/I_2) максимуму, так и абсолютное значение площади пика однократного рассеяния (I_3). Так, счетность I_3 для тротила при угле рассеяния 120° отличается от этого параметра у близких к тротилу по составу и плотности веществ на величину, значительно большую $3\sqrt{I_3}$.

Таблица 2

Параметры рассеянного γ -излучения с защитой

Угол рассеяния, град	Защита	Материал отражателя	Плотность	$Z_{эфф}$	I_1		I_2		I_3		I_3 / I_1	I_3 / I_2
					с фоном	без фона	с фоном	без фона	с фоном	без фона		
105	Алюминий (5 мм)	Полиэтилен	1,23	6,97	29295	4052	40895	9182	49664	30998	7,06	3,12
		Мыло	1,48	7,68	30098	4855	41750	10037	50887	32835	6,14	2,97
		Тротил	1,79	7,59	29671	4428	41454	9741	53267	34932	7,28	3,31
		Графит	1,89	6,71	31702	6459	44753	13040	56493	35403	5,49	2,72
	Дерево (10 мм)	Мыло	1,04	6,88	31644	6401	43434	11721	51903	29390	4,82	2,63
		Тротил	1,31	6,99	31551	6308	42615	10902	55413	31752	5,45	3,15
		Графит	1,40	6	31153	5910	44238	12525	56430	32417	5,98	2,82
		Алюминий	1,96	12,81	32544	7301	47650	15937	60130	35896	5,35	2,45
	Сталь (0,5 мм)	Полиэтилен	1,06	9,84	28602	3359	40065	8352	49516	29711	8,48	3,41
		Мыло	1,35	9,77	29097	3854	40968	9255	50409	32108	7,62	3,17
		Тротил	1,72	9,44	30083	4840	40967	9254	53555	34501	6,71	3,51
		Графит	1,83	8,33	30923	5680	44133	12420	55425	35052	6,05	2,77
	Алюминий	2,85	13,64	33696	8453	49416	17703	60969	38928	4,72	2,26	
120	Алюминий (5 мм)	Полиэтилен	1,23	6,97	29522	4279	40139	8426	52140	31704	7,27	3,69
		Мыло	1,48	7,68	29634	4391	40651	8938	53583	33855	7,41	3,64
		Тротил	1,79	7,59	30396	5153	41483	9770	55930	39280	6,77	3,57
		Графит	1,89	6,71	31064	5821	43913	12200	58331	36891	6,4	3,06
	Дерево (10 мм)	Мыло	1,04	6,88	29220	3977	40097	8384	53076	31005	8,05	3,82
		Тротил	1,31	6,99	31678	6435	42788	11075	59356	32593	5,95	3,46
		Графит	1,40	6	31311	6068	44216	12503	58692	33257	6,2	3,01
		Алюминий	1,96	12,81	45895	20652	47930	16217	64503	37393	2,1	2,68
	Сталь (0,5 мм)	Мыло	1,35	9,77	28776	3533	40048	8335	51524	32777	8,63	3,66
		Тротил	1,72	9,44	30271	5028	40767	9054	54939	35704	6,74	3,74
		Графит	1,83	8,33	31026	5783	43486	11773	57164	36592	6,25	3,07
		Алюминий	2,85	13,64	32060	6817	47450	15737	64094	40831	6,31	2,74

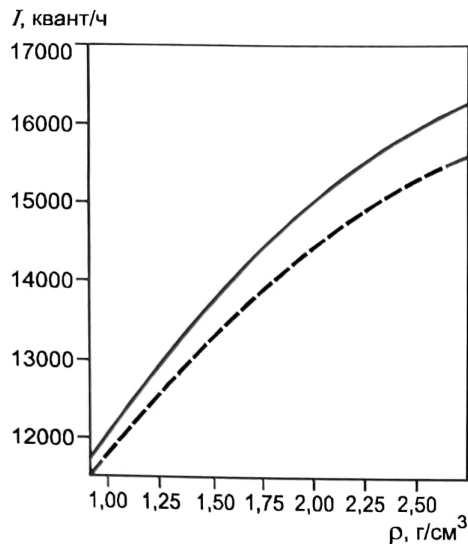


Рис. 4 Зависимость интенсивности рассеянного излучения от плотности отражателя (сплошная линия – угол рассеяния 120°, пунктирная – 105°)

Результаты исследования энергетических спектров рассеянного γ -излучения также в основной геометрии, но при наличии между прибором (зондом) и отражателем (объектом контроля) инородных предметов (защиты) представлены на рис. 3 и в табл. 2.

В качестве защиты применялись листы размером 50×50 см из алюминия, дерева и стали толщиной 5, 10 и 0,5 мм, соответственно. Защита плотно прилегала к отражателю (мыло, тротил, графит, алюминий, полиэтилен). В табл. 2 указана усредненная по длине луча плотность отражателя и защиты, которую можно рассчитать по следующей формуле:

$$\rho = (l_1\rho_1 + l_2\rho_2) / (l_1 + l_2),$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности отражателя и защиты; l_1 и l_2 — длины лучей квантов в них.

На основании представленных экспериментальных данных были построены зависимости интенсивности рассеянного излучения от плотности облучаемых веществ $I(\rho)$, на-

ходящихся за защитой или без нее (рис. 4). Функция интенсивности рассеянного излучения от плотности облучаемого вещества без защиты, полученная квадратичной экстраполяцией, имеет вид

$$I = 9654,3 + 2883,8\rho - 365,6\rho^2 \text{ для угла } 105^\circ;$$

$$I = 7761,1 + 5741,9\rho - 877,9\rho^2 \text{ для угла } 120^\circ,$$

где интенсивность измеряется в квантах на час, а плотность — в граммах на см^3 .

Как и без защиты, площадь пика однократного рассеяния при наличии тротила заметно отличается от такого же параметра близких к тротилу по составу и плотности веществ и может использоваться как идентификационный признак ВВ.

Измерения в малой и полубесконечной геометрии. Исследования энергетических спектров рассеянного γ -излучения в случае малой геометрии проводились при угле рассеяния 120°. Цель данных измерений состояла в натурной проверке работы прибора (зонда), параметры которого были найдены расчетом методом Монте-Карло [1, 4]. Этот зонд был назван оптимальным по той причине, что график зависимости $I(\rho)$ (интенсивности от плотности) данного зонда имеет как доинверсионную, так и заинверсионную области, т. е. максимум при какой-то определенной плотности вещества и угле рассеяния. Вещество с плотностью, максимум которой определяется зависимостью $I(\rho)$, назовем «тестовым». «Малая» геометрия измерений была построена на основе теоретических расчетов [2] при условии, что «тестовым» веществом выбран тротил. Необходимо было обеспечить выполнение основного условия оптимальности, основанного в [2], а именно: длины свободного пробега первичного и рассеянного квантов не должны превышать реальный путь квантов в облучаемом веществе. Толщина двух тротильных шашек не превосходила длину свободного пробега кванта с энергией 662 кэВ (^{137}Cs) в тротиле (около 80 мм). Поэтому между прибором и отражателем (тротилом) вводилось дополнительное вещество (фильтр) таким образом, чтобы с учетом его плотности и толщины выполнить условия оптимальности по пробегу квантов. Оценки показали, что в случае рассеяния под углом 120° в качестве фильтра можно использовать полиэтилен толщиной 50 мм.

Параметры рассеянного излучения в условиях «малой» геометрии при угле рассеяния 120°

Таблица 3

Материал отражателя	Плотность	$Z_{\text{эфф}}$	I_1		I_2		I_3		I_3 / I_1	I_3 / I_2
			с фоном	без фона	с фоном	без фона	с фоном	без фона		
Без защиты										
Полиэтилен	0,93	5,61	11376	838	15015	1853	21915	13590	16,22	7,33
Мыло	1,08	6,42	12070	1532	15758	2596	24483	16158	10,55	6,22
Тротил	1,27	6,56	12889	2351	17156	3994	24775	16450	6	4,12
Графит	1,33	5,87	13515	2977	18177	5015	28253	19928	6,69	3,97
Алюминий	1,84	11,71	14683	4145	20684	7522	30993	22668	5,47	3,01
С защитой из стали 0,5 мм										
Полиэтилен	0,96	8,09	10855	317	14641	1479	21158	12833	40,48	8,68
Мыло	1,11	9,57	11675	1137	15497	2335	23732	15407	13,55	6,6
Тротил	1,3	9,14	12521	1983	16881	3719	24354	16029	8,08	4,31
Графит	1,36	7,74	13163	2625	17999	4837	27930	19605	7,47	4,05
Алюминий	1,87	12,2	13504	2966	19508	6346	27375	19050	6,42	3

Параметры рассеянного излучения в алюминии и полиэтилене при угле рассеяния 105°
в условиях полубесконечной геометрии

Таблица 4

Материал отражателя	Плотность	$Z_{эфф}$	I_1		I_2		I_3		I_3 / I_1	I_3 / I_2
			с фоном	без фона	с фоном	без фона	с фоном	без фона		
Алюминий	2,75	13	32520	7298	47821	16132	56740	37005	3,44	1,69
Полиэтилен	0,93	5,61	28389	3146	44316	7901	49651	29898	5,4	2,63

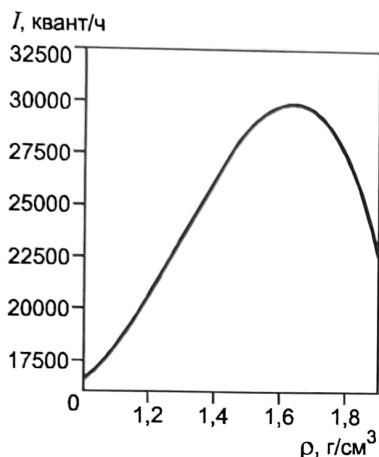


Рис. 5. Рабочая характеристика «тестового» прибора

алюминий толщиной 17 мм и т. д. В экспериментах использовали полиэтилен.

Были сняты спектральные зависимости для отражателей, плотность которых лежит в интервале 0,93—2,75 г/см³, а также для случаев, когда между теми же отражателями и фильтром был установлен стальной лист толщиной 0,5 мм. Результаты измерений спектров в «малой» геометрии приведены в табл. 3. Плотность веществ усреднена, как и ранее, по длине пути кванта. Из табл. 3 видно, что установка фильтра из материала с большим Z увеличивает эффективный атомный номер объекта с тротилом до 9,14, создавая условия для реализации селективного γ -метода (аналог селективного γ -каротажа в ядерной геофизике). Зависимость интенсивности рассеянного в «малой» геометрии излучения (с защитой из стали) от плотности показана на рис. 5. График имеет четко выраженный максимум в области плотностей, близких к тротилу — «тестовому» веществу, на которое и настраивался прибор.

Опыты, проведенные в полубесконечной геометрии, показали, что использование жесткой коллимации источника и детектора позволяет собрать излучение в узкие пучки, во всяком случае, в рассматриваемом интервале плотностей и геометрических размеров облучаемых объектов (табл. 4).

Анализ соответствующих значений, приведенных в табл. 1 и 4, показывает, что коллиматоры, используемые в экспериментальной установке, позволяют регистрировать γ -кванты, рассеянные в определенной, наперед заданной области.

Выводы. 1. Существует возможность настройки поискового зонда на вещество определенной плотности, например, тротил, так как зависимость интенсивности регистрируемого γ -излучения от плотности $I(\rho)$ для такого зонда имеет четко выраженный максимум, соответствующий плотности поискового («тестового») вещества. Однозначно определена зависимость $I(\rho)$ для различной геометрии прибора и в первом приближении сформулированы некоторые требова-

ния к нему. Например, оценки, проведенные на основе полученных экспериментальных данных, показывают, что для идентификации тротила с источником ¹³⁷Cs (662 кэВ) мощностью 8 мКи требуется время экспозиции 10 мин. При этом диаметр коллиматоров источника и детектора 20 мм, их длина 200 мм, ось коллимации источника составляет с поверхностью облучаемого объекта угол 45°, ось коллимации детектора наклонена к ней под углом 115—120°, длина зонда 20 см. При выполнении данных условий интегральная плотность вещества определяется с погрешностью менее 1%.

2. По отношению площадей пиков однократно рассеянного излучения и мягкой составляющей рассеянного излучения можно получить информацию о типе защиты или, зная тип защиты, получить более точную информацию об исследуемом веществе. Площадь пика однократно рассеянного излучения может быть предложена в качестве дополнительного критерия идентификации взрывчатого вещества, если известен тип защиты.

3. Томографический анализ эффективного атомного номера исследуемого вещества следует проводить по стандартным методикам, разработанным в ядерной геофизике (селективный γ - γ -каротаж), с тем дополнением, что между исследуемым объектом и прибором необходимо вводить фильтры, увеличивающие эффективный атомный номер до значений, превышающих 10.

4. Можно предварительно сформулировать назначение и состав двух приборов, работающих по принципу плотностной (ρ) и селективной ($Z_{эфф}$) γ - γ -томографии.

Первый — прибор γ - γ -томографии для определения плотности ВВ — можно выполнить в виде стационарного образца с одним источником и минимум пятью детекторами γ -излучения для исследования ручной клади. Необходимого количества лучей томографии можно добиться путем пошагового вращения системы источник — детекторы и, соответственно, делая несколько снимков объекта с разных положений. Для томографии эффективного атомного номера потребуется большее время экспозиции и введение дополнительных фильтров, поэтому данный вид анализа можно включить как опцию.

Второй — прибор экспресс-анализа для обнаружения ВВ, находящихся на небольшой глубине, непосредственно за непроницаемой для испарений ВВ перегородкой. Он может быть изготовлен в виде, близком к зонду плотностной γ - γ -томографии, и использован как сканер, движущийся с постоянной скоростью вдоль исследуемого объекта. Данный прибор предлагается использовать только для томографии плотности и применять в нем не более двух жестко коллимированных детекторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев М. В., Бондаренко В. М., Кириллов В. М. // Геологическое изучение и использование недр. — 2000. — № 2. — С. 39.

2. **Алексеев М. В., Бондаренко В. М.** // Тез. докл. Междунар. геофизич. конф. «300 лет горно-геологической службе России». — СПб., 2000.
3. **Филиппов Е. М.** Ядерная геофизика. Т. 1. — Новосибирск: Наука, 1973.

4. **Хаматдинов Р. Т.** // Атомная энергия. — 1976. — Т. 40. — Вып. 3. — С. 260.

Дата одобрения 04.12.2002 г.