

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГРУНТОВ
ПРОМПЛОЩАДКИ ОБЪЕКТА “УКРЫТИЕ” ^{137}Cs ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ****А. К. Калиновский, В. Г. Батий, А. А. Правдивый***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

Разработан метод анализа структуры загрязнения грунтов ^{137}Cs по результатам спектрометрических исследований гамма-излучения в скважинах, проходящих через радиоактивно загрязненные грунты. Для практической реализации метода был создан полевой спектрометрический комплекс и выполнены необходимые методические измерения на экспериментальных моделях по изучению характеристик гамма-излучения. Предложена математическая модель скважины, адекватная экспериментальным моделям, для расчетов с помощью программы MCNP4. Приведены результаты практического применения метода при анализе структуры радиоактивного загрязнения грунтов, слагающих геологический разрез локальной зоны объекта “Укрытие”.

В результате ликвидации последствий аварии на ЧАЭС грунты, слагающие геологический разрез локальной зоны объекта “Укрытие”, подверглись значительному радиоактивному загрязнению. В настоящее время в этих грунтах, в связи с осуществлением мероприятий по преобразованию объекта “Укрытие” в экологически безопасную систему, предполагается проведение земляных работ по созданию фундаментов будущих зданий и инженерных коммуникаций. Поэтому особую важность приобретают задачи по определению пространственного расположения и оценки экологической опасности радиоактивных материалов (РМ), локализованных в грунтах вокруг объекта “Укрытие”. Решение этих задач будет способствовать более точному прогнозированию объемов и категорий радиоактивных отходов (РАО), образующихся при проведении земляных работ, а также выработке оптимальных технологий выемки грунта.

Постановка задачи

Одним из традиционных методов изучения пород грунта по гамма-излучению является гамма-каротаж. На рис. 1 представлена диаграмма, отображающая зависимость изменения мощности экспозиционной дозы (МЭД) по стволу скважины от глубины и построенная по результатам гамма-каротажа скважины 10-1, расположенной на промплощадке объекта “Укрытие”. При комплексном анализе информации о мероприятиях, проводимых при ликвидации аварии на ЧАЭС, данных о керне скважин и результатов гамма-каротажа скважин были установлены некоторые особенности залегания РМ в грунтах, слагающих геологический разрез промплощадки объекта “Укрытие” [1 - 4]. Это позволило охарактеризовать геологический разрез и выделить четыре зоны (слоя) грунтов (см. рис. 1).

Зона 1 – послеаварийный техногенный слой. Этот насыпной слой образовался в процессе дезактивации территории, прилегающей к разрушенному блоку. Основная цель его создания - снижение уровней доз облучения персонала, выполнявшего строительство и обслуживающего объект “Укрытие”. Данный слой грунтов распространен по всей локальной зоне и имеет мощность залегания от 1 до 3 м, а на отдельных участках до 10 м.

Зона 2 – “активный” слой. Был радиоактивно загрязнен в первые дни аварии и сформировался в процессе ликвидации ее последствий преимущественно при перемешивании поверхностного слоя грунта различными механизмами (автотранспортом, бульдозерами и т.д.). Этот слой, имея небольшую мощность залегания в пределах 0,15 - 0,5 м, является наиболее радиоактивно загрязненным. Его активность превышает активность других зон в десятки тысяч раз, что и явилось основным критерием его выделения.

© А. К. Калиновский, В. Г. Батий, А. А. Правдивый, 2005

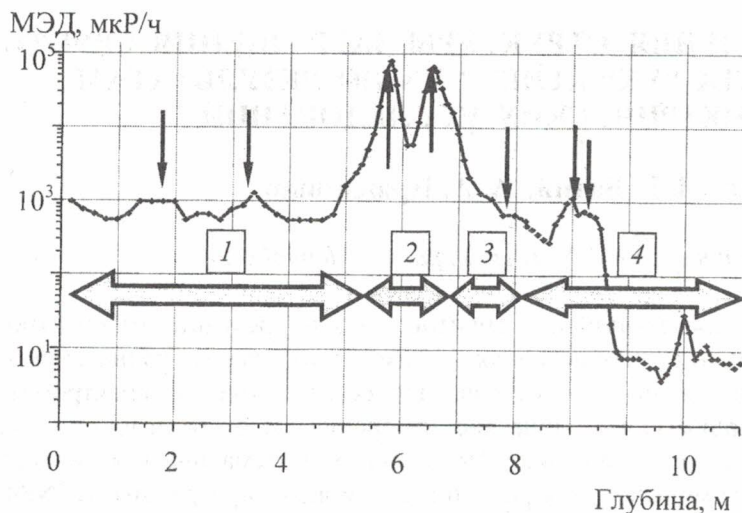


Рис. 1. Кривая каротажа скважины 10-1А с указанием точек выполнения гамма-спектрометрических измерений.

Зона 3 – доаварийные техногенные грунты. Образовались при строительстве ЧАЭС, мощность отложений составляет от 1 до 8 м.

Зона 4 – естественные аллювиальные отложения, представленные песками мелкой и средней крупности. Мощность данных отложений выше уровня грунтовых вод достигает 2,5 м.

Данные зоны представляют интерес, так как интенсивность гамма-излучения на глубинах их залегания существенно превосходит уровни излучения, создаваемые естественными излучателями. Кроме того, эти зоны грунтов, вероятно, различаются по структуре (однородности и формам) радиоактивного

загрязнения, так как они образовывались в различные периоды после аварии. В грунтах, слагающих геологический разрез промплощадки, вероятно, присутствуют как равномерные бесконечные и ограниченные по мощности радиоактивные пласты, так и участки, содержащие фрагменты реакторной зоны разрушенного реактора 4-го блока, активность которых превосходит удельную активность окружающего грунта в миллионы раз. Особый интерес вызывают грунты, приуроченные к интервалам доаварийных техногенных грунтов и аллювиальных отложений, где по результатам анализа данных гамма-каротажа выявлено аномальное увеличение интенсивности гамма-поля. Одной из основных гипотез, объясняющих это явление, может быть нарушение технологии бурения и обустройства скважин и, как результат, механический перенос радиоактивных частиц из “активного” слоя на уровень нижележащих грунтов вдоль внешних стенок обсадных труб [5]. В этом случае, такое загрязнение вокруг скважин можно отнести к поверхностным источникам излучения. Однако не следует исключать то, что такое увеличение МЭД может быть связано с миграцией радионуклидов из “активного” слоя под действием механизмов сорбции и десорбции, тогда это радиоактивные пласты и эти интервалы грунтов необходимо учитывать при оценке объемов РАО.

С целью определения структуры загрязнения грунтов ^{137}Cs авторами был предложен метод, основанный на анализе характеристик гамма-излучения в скважинах. Некоторые теоретические аспекты и часть экспериментальных исследований были освещены в работах [6 - 8]. В данной работе продолжено изучение характеристик гамма-излучения в зависимости от структуры радиоактивного загрязнения грунтов как на экспериментальных моделях, так и с применением методов математического моделирования. Показано практическое применение для определения структуры радиоактивного загрязнения грунтов промплощадки объекта «Укрытие», а также определены необходимые экспериментальные параметры для формирования описаний математических моделей скважин, адекватных экспериментальным.

Описание полевой спектрометрической аппаратуры

Проведение полевых гамма-спектрометрических измерений (ГСИ) в условиях промплощадки было затруднено высоким уровнем интенсивности излучения в скважинах и отсутствием стандартных широкодиапазонных гамма-спектрометров с выносными детекторами. Поэтому для выполнения измерительных работ в скважинах локальной зоны методом

ГСИ в лаборатории ядерно-физических методов анализа МНТЦ “Укрытие” НАН Украины был создан полевой спектрометрический измерительный комплекс со сменными зондами детектирования. Зонд № 1 собран на базе кристалла NaI(Tl) размером $\varnothing 63 \times 63$ мм, а зонд № 2 – на базе кристалла $\text{Vi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{13}$ (БГО) размером $\varnothing 15 \times 5$ мм. Эффективный телесный угол регистрации фотонов этих зондов близок к 4π . В зонде № 3 использован кристалл NaI(Tl) размером $\varnothing 16 \times 20$ мм, помещенный в защитный свинцовый коллиматор толщиной 8 мм. Упрощенная схема, отображающая конструктивные особенности измерительного зонда, представлена на рис. 2. В результате такой конструкции (наличие коллиматора) телесный угол регистрации фотонов лежит в азимутальной плоскости и практически равен 2π , что способствует снижению потока рассеянных фотонов, падающих на кристалл NaI(Tl), и уменьшению влияния краевых эффектов. Как результат – увеличение энергетического разрешения измерительного зонда.

Для калибровки и оценки разрешения спектрометрического тракта использовались радиоактивные источники ^{137}Cs и ^{60}Co из комплекта образцовых спектрометрических источников гамма-излучения (ОСИ). При анализе калибровочных спектров определено, что энергетическое разрешение для гамма-линии 662 кэВ ^{137}Cs составляет для зондов № 1 и № 3 не более 10, 7 % соответственно, а для зонда № 2 – 17 %. Установлен энергетический диапазон регистрации гамма-квантов от 20 кэВ до 3,0 МэВ. Определены плотности потока гамма-квантов, при которых сцинтиляционные кристаллы измерительных зондов сохраняют свои спектрометрические свойства.

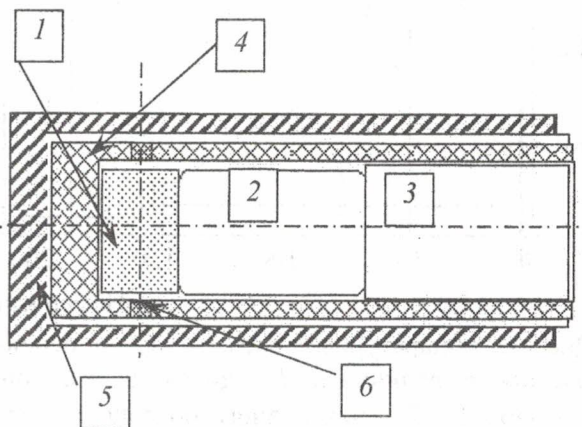


Рис. 2. Принципиальное устройство измерительных зондов: 1 – сцинтиляционный кристалл; 2 – ФЭУ; 3 – держатель; 4 – свинцовый экран; 5 – защитный кожух; 6 – коллимирующий диск.

Экспериментальное моделирование гамма-излучения в скважинах

Для экспериментального исследования характеристик гамма-поля в скважинах, проходящих через грунты, загрязненные гамма-излучателями среднетопливного чернобыльского состава, были созданы модели, имитирующие такое радиоактивное загрязнение.

Модели скважин представляют собой цилиндрические металлические емкости, заполненные грунтом. В центре размещены полиэтиленовые трубы, служащие стволами скважин. Для моделирования структур радиоактивного загрязнения грунтов, характерных для локальной зоны объекта “Укрытие”, и определения характеристик гамма-излучения внутри сухой необсаженной скважины использовали метод, основанный на применении модели скважины № 1 и квазиточечного источника ^{137}Cs [6, 8]. Для контроля точности определения параметров на модели скважины № 1, калибровки спектрометров, отработки навыков проведения ГСИ применялась модель скважины № 2. В этой модели на глубине 60 см от поверхности грунта был сформирован однородный радиоактивный слой толщиной 20 см с известной удельной активностью. Радиоактивный грунт, используемый для создания “активного” слоя, перед засыпкой тщательно перемешивался. С целью контроля однородности было отобрано несколько проб грунта и проведены лабораторные измерения радионуклидного состава и активности на полупроводниковом детекторе из сверхчистого германия (энергетическое разрешение 1,2 кэВ на линии 661,6 МэВ). По результатам измерений определили, что расхождение между активностью ^{137}Cs в пробах не превышает 3 % при погрешности лабораторного определения ^{137}Cs в этих образцах менее 10 % [8]. Это указывает на хорошую однородность радиоактивного грунта. Состав и соотношения

радионуклидов в пробах грунта практически совпадают с среднетопливным составом ядерного топлива реактора 4-го блока.

На рис. 3 представлен аппаратурный спектр в скважине, проходящей через радиоактивно загрязненный ^{137}Cs грунт, и указаны величины, выбранные для характеристики структуры радиоактивного загрязнения.

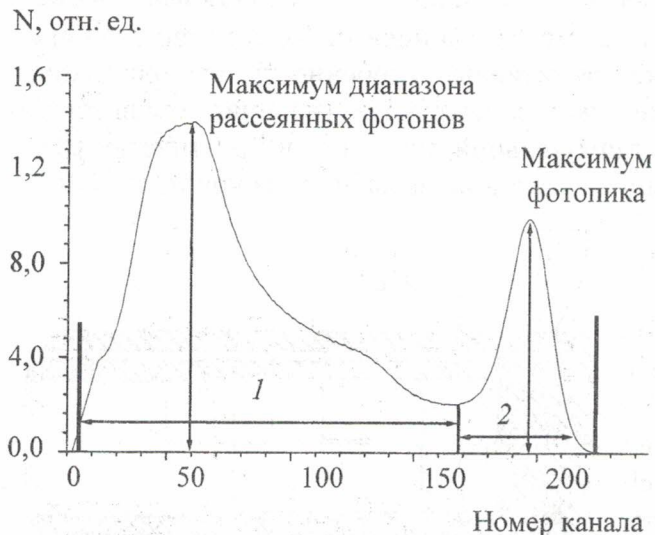


Рис. 3. Аппаратурный спектр ^{137}Cs и основные расчетные величины: 1 – диапазон рассеянных фотонов, S_p ; 2 – пик полного поглощения гамма-квантов энергией E_0 (662 кэВ), S_ϕ .

По результатам серии экспериментальных измерений на модели скважины № 1 [8] для каждого зонда определены коэффициенты K_o , K_n , K_y согласно выражению $K = S_\phi / S_p$ для различной структуры радиоактивного загрязнения грунтов ^{137}Cs : K_o – коэффициент, соответствующий отношению S_ϕ / S_p для объемного равномерного загрязнения грунтов, K_n – поверхностного (затрубного) загрязнения ствола скважины, K_y – неравномерного загрязнения грунтов (наличие в грунтах, окружающих скважину, одиночных удаленных высокоактивных фрагментов реакторной зоны на расстоянии более чем две величины свободного пробега гамма-квантов с энергией 662 кэВ).

При анализе экспериментальных данных и результатов полевых исследований

выяснилось, что для характеристики структуры загрязнения грунтов при расчетах K_o , K_n , K_y можно использовать отношение максимума фотопика M_ϕ к максимуму диапазона рассеянных фотонов M_p , так как оно линейно коррелирует с отношением S_ϕ и S_p , при этом вычисляется гораздо проще.

Значения коэффициентов (M_ϕ / M_p) K_o , K_n , K_y и оценки погрешности их определения для наших измерительных зондов представлены в табл. 1. Эти коэффициенты получены для условий сухой необсаженной скважины, когда детектор измерительного зонда находится на уровне максимального или постоянного значения МЭД в скважине, что обеспечивает минимальную погрешность.

Таблица 1. Результаты определения значений коэффициентов K_o , K_n , K_y

Тип измерительного зонда	K_n		K_o		K_y	
№ 1	0,66	10 %	0,36	10 %	0,22	15 %
№ 2	0,40	15 %	0,18	20 %	0,10	30 %
№ 3	0,73	10 %	0,45	10 %	0,31	15 %

Математическое моделирование гамма-излучения в скважинах

Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) использован авторами, так как довольно сложно аналитически описать функциональную связь в процессе прохождения гамма-квантов в поглощающей среде. При этом проводимые расчеты фактически являются математическим моделированием физического процесса и, в соответствии с вероятностными законами, прослеживается история (испытание) каждого кванта от возникновения, в процессе движения в среде (рассеяние, образование индуцируемого излучения) и до полного поглощения.

Для расчетов спектрального распределения фотонов в скважине использовали компьютерную программу MCNP4, реализованную на основе принципов метода Монте

Карло, а также математическую модель скважины, которая представляет собой кольцевой цилиндр, в геометрическом центре которого помещен идеальный детектор. Высота цилиндра, разница внешнего и внутреннего диаметров соответствуют размерам экспериментальной модели скважины № 1. В качестве материала тела цилиндра использовалась смоделированная гомогенная среда, элементный состав и плотность примерно совпадают с грунтом, заполнявшим экспериментальную модель. Приблизительный химический состав модельной среды: кремний – 42,1 %, кислород – 56,8 %, водород – 1,1 %.

При расчете энергетического спектра фотонов в центре математической модели учитывался вклад первичного, рассеянного и индуцированного (рентгеновского) излучения. Дискриминация низкоэнергетической области спектра излучения производилась на уровне 20 кэВ.

Идеальный детектор выбран намеренно, чтобы рассчитанное энергетическое распределение фотонов в точке детектирования не зависело от эффективности регистрации фотонов. Это позволило по результатам анализа серии расчетов и калибровочных измерений на экспериментальных моделях определить “функцию отклика” измерительных зондов и коэффициенты перехода от расчетных отношений S_{ϕ}/S_p к экспериментальным для каждого измерительного зонда (см. табл. 1) и подтвердить на основе принципов подобия адекватность математической модели скважины экспериментальной.

Так как радиоактивно загрязненные грунты имеют различные физико-химические свойства, то с помощью MCNP4 исследовалась зависимость формы спектра и величины коэффициентов K_o , K_n , K_y от химического состава и плотности смоделированных сред (грунтов) (табл. 2). Эти модельные грунты соответствуют реальным средам, представляющим собой смесь песка, бетона и железа:

1-й тип – смесь песка (SiO_2 88 %), воды (H_2O 10 %) и органики (C 2 %);

2-й тип – строительный бетон;

3-й тип – строительный бетон, армированный железом в пропорции 80 и 20 %.

Кроме того, там же (см. табл. 2) приведены значения параметров, характеризующие элементный состав смоделированных грунтов: коэффициент приведения к нормали N и эффективный атомный номер Z .

Таблица 2. Элементный состав, плотность и параметры смоделированных сред

Тип среды	Содержание основных химических элементов, %									ρ , г/см ³	Z	N
	C	O	Na	Al	Si	K	Fe	Ca	Σ **			
1	2,0	55,8	*	*	41,1	*	*	*	1,1	1,6	10,4	1,011
2	*	49,8	1,7	4,6	31,6	1,9	1,2	8,3	0,9	2,35	11,6	1,002
3	*	42,3	*	1,8	29,1	*	20,5	3,3	3	3,23	14,0	0,992

* Данные элементы в составе отсутствуют или их содержание менее 1 %.

** Сумма значений элементов, содержание которых менее 1 %.

В результате расчетов определили, что с увеличением эффективного атомного номера и плотности грунтов для значений K_n , K_o характерно увеличение, а для K_y – уменьшение. Также эти расчеты позволили определить поправочные коэффициенты пересчета экспериментальных данных (см. табл. 1) для применения их при анализе результатов полевых ГСИ в скважинах, проходящих через радиоактивно загрязненные грунты, химический состав и параметры которых подобны данным смоделированных сред (см. табл. 2). Это позволило более точно определять структуру радиоактивного загрязнения грунтов.

Необходимо отметить, что точность расчетов методом Монте Карло зависит как от погрешности используемых экспериментальных данных, так и от количества разыгранных историй. В наших расчетах программой MCNP4 эта величина была не менее 100 млн, что обеспечивало статистическую погрешность менее 0,1 %, а суммарную погрешность расчетов спектров менее 10 %.

Результаты ГСИ в скважинах промплощадки объекта «Укрытие»

По результатам выполнения экспериментальных исследований на моделях скважин и расчетов методами математического моделирования была разработана методика выполнения ГСИ и интерпретации результатов. Ее применение рассмотрим на примере выполнения ГСИ скважины 2021, расположенной за пределами локальной зоны, с помощью зонда № 1. По данным гамма-каротажа скважины 2021 построена каротажная кривая (рис. 4). По этой

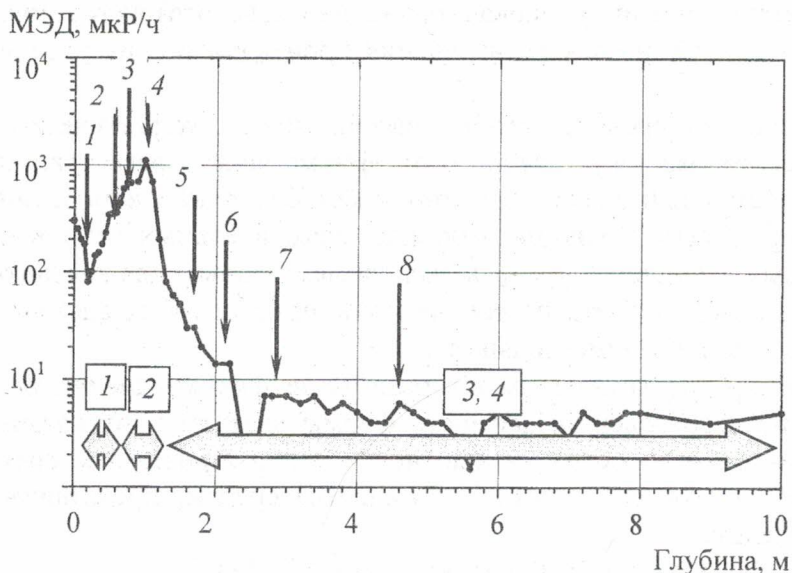


Рис. 4. Кривая гамма-каротажа скважины 2021 с указанием точек выполнения ГСИ.

кривой выделялись зоны грунтов, отображающие временные периоды их образования относительно аварии на ЧАЭС, и выбирались точки для выполнения ГСИ. Затем по результатам ГСИ охарактеризовали структуру радиоактивного загрязнения этих зон грунтов.

Зона 1. Слой послеаварийных техногенных грунтов. Коэффициенты K (M_{ϕ}/M_p), рассчитанные по результатам ГСИ в точках 2 и 3 и приведенные к условиям сухой необсаженной скважины, равны 0,40 и 0,37, соответствуют величине коэффициента для объемного равномерного загрязнения (см. табл. 1). Следова-

тельно, этот интервал можно охарактеризовать как объемное равномерное загрязнение, состоящее практически из однородных пропластов малой мощности со снижением активности ^{137}Cs к поверхности. Это вполне объяснимо, так как в период их формирования ряд факторов (непрерывные маломощные выбросы радиоактивных аэрозолей из развалов разрушенного 4-блока ЧАЭС и вторичный пылеподъем в результате движения транспорта и ветра) способствовал практически равномерному загрязнению относительно радиоактивно чистых насыпных грунтов. Увеличение МЭД к поверхности на глубине 0 - 0,2 м (см. рис. 4) связано с поверхностным загрязнением территории вокруг скважины и влиянием рассеянного излучения от объекта «Укрытие» (точка 1, $K = 0,26$).

Зона 2. Аварийная поверхность на глубине 0,9 - 1,1 м – наиболее радиоактивно загрязненный слой грунтов. МЭД в этом диапазоне глубин превосходит фоновое значение (определяемое излучением естественных радионуклидов) более чем в 1000 раз. Отношение максимумов фотопика и диапазона рассеянных фотонов (точка 4) равно 0,28, что указывает на неравномерности загрязнения данного интервала.

Зона 3, 4. Слой доаварийных техногенных и естественных грунтов 1,1 - 7 м. Здесь можно выделить два интервала глубин: 1,1 - 2 м, в котором гамма-поле в скважине по результатам ГСИ определяется поверхностным (затрубным) загрязнением ^{137}Cs (точка 5, $K = 0,6$; точка 6, $K = 0,65$); ниже 2 м, здесь гамма-поле внутри скважины формируется, в основном, естественными радионуклидами уранового и ториевого рядов, а также ^{40}K (точки 7 и 8), и МЭД соответствует фоновому уровню. Однако на рис. 5, где представлен аппаратный спектр в скважине (точка 8), отчетливо различим пик полного поглощения фотонов с энергией 662 кэВ ($K = 0,4$), но здесь метод определения структуры загрязнения прямо не применим. Поэтому при этих условиях дополнительно использован метод разложения сложного спектра на элементарные. В результате обработки получен спектр, в котором отношение M_{ϕ} и M_p характерно для поверхностного (затрубного) загрязнения скважины ^{137}Cs ($K = 0,6$).

По результатам гамма-каротажа и ГСИ скважины 10-1А, расположенной на пересечении строительных координат (ось 59, ряд Л), рассмотрим пример характеризации структуры радиоактивного загрязнения грунтов, слагающих геологический разрез отдельного участка локальной зоны объекта "Укрытие". Отличительной особенностью данного участка является ярко выраженная бимодальность каротажной кривой скважин (см. рис. 1) на глубине "активного" слоя.

В интервале 1,2 - 4,1 м (зона 1) спектр гамма-излучения по результатам ГСИ соответствует равномерному объемному загрязнению, возникшему при засышке территории грунтами, загрязненными вследствие оседания аэрозолей из развалов разрушенного 4-го блока и при вторичном пылеподъеме. При этом в период их создания (июнь - сентябрь 1986 г.) суммарная концентрация гамма-излучающих нуклидов вблизи разрушенного блока изменялась от 10^2 до 10^4 Бк / м³ [9].

В интервале глубин 5,5 - 5,9 м и 6,3 - 6,9 м (зона 2) находится "активный" слой, возникший в результате загрязнения поверхности грунта в момент аварии РМ и фрагментами ядерного топлива из разрушенной реакторной зоны 4-го блока. Вероятно, источники гамма-излучения по активности относительно однородны, так как спектры гамма-излучения в скважине на этих интервалах глубин соответствуют характеристикам объемного равномерного источника. Такую форму "активного" слоя (бимодальную) с учетом хронологии ликвидации последствий аварии и анализа керна скважины можно объяснить следующим образом. Интервал 6,3 - 6,9 м, приуроченный к уровню аварийной поверхности, перекрыт бетоном со щебнем (с целью снижения доз облучения строителей объекта "Укрытие") в первые дни. "Активный" слой на глубине 5,5 - 5,9 м образовался в результате дальнейших мероприятий по ликвидации последствий аварии (перемещения радиоактивного грунта к стенам 4-го блока и т.д.). В интервале 7,2 - 9,8 м (зона 3) по результатам ГСИ имеет место поверхностное загрязнение, вероятно, произошедшее в процессе бурения скважины.

На расстоянии порядка 5 м от скважины 10-1А пробурена скважина-спутник 10-2Д глубиной 7 м. Формы каротажных кривых этих скважин и результаты ГСИ практически совпадают между собой, что подтверждает выводы по структуре радиоактивного загрязнения грунтов геологического разреза этого участка, сделанные по скважине 10-1А.

На промплощадке объекта "Укрытие" были проведены ГСИ в ряде скважин 8180А, 8178А, 3-3Д, 7982, 10-2Д, 10-1А, 8179, 4-3Н, 4-4Н, 3-Г, 2-Г, 7-Б. По результатам измерений в этих скважинах можно сделать следующие выводы:

1. Для интервалов грунтов, находящихся на глубинах ниже "активного" слоя и выше уровня грунтовых вод и имеющих аномальное увеличение МЭД, как правило, спектр гамма-излучения соответствует поверхностному загрязнению.

2. Слои грунтов, лежащие выше "активного" слоя практически всегда имеют спектр гамма-излучения, характерный для равномерного объемного загрязнения.

3. Для "активного" слоя чаще всего характерен спектр гамма-излучения равномерного объемного загрязнения. Однако иногда встречается спектр неравномерного загрязнения, но исходя из консервативного подхода при оценке радиационной опасности грунтов, эти грунты необходимо отнести к равномерному объемному загрязнению.

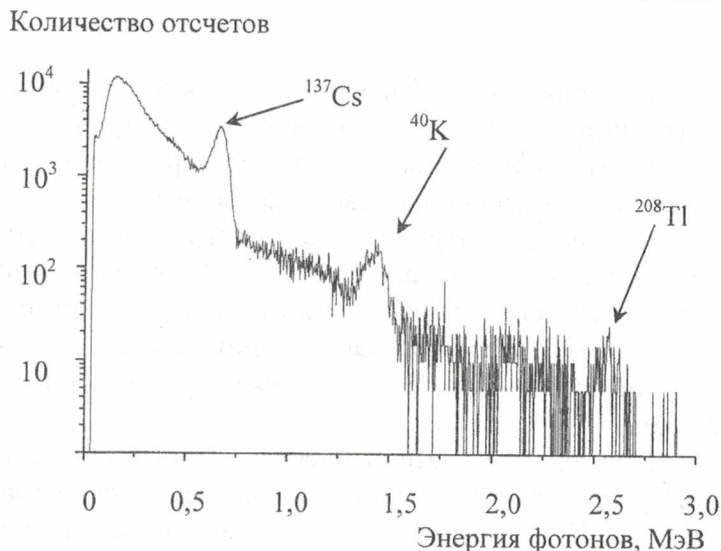


Рис. 5. Аппаратурный спектр фотонов на уровне залегания естественных грунтов.

Выводы

1. Поскольку ниже “активного” слоя в обследованных скважинах обнаружен только спектр гамма-излучения, соответствующий поверхностному загрязнению, то это указывает на то, что загрязнение этих слоев грунта произошло в процессе бурения за счет переноса радиоактивных частиц вдоль ствола скважины.

2. Форму аппаратного спектра и коэффициенты K_o , K_n , K_y , служащие критериями при определении структуры радиоактивного загрязнения грунтов ^{137}Cs , рекомендуется определять для каждого конкретного измерительного зонда, с которым предполагается проводить ГСИ измерения, так как они зависят не только от спектра излучения, но и существенно от конструкции измерительного зонда (материала и размеров кристалла детектора).

3. Применение математического моделирования для определения характеристик гамма-излучения в скважинах позволило оценить общие закономерности изменения коэффициентов K_o , K_n , K_y и снизить объемы исследовательских работ на экспериментальных моделях скважин.

4. Основное преимущество разработанного метода от методов опробования керна по гамма-излучению и описанного [5] в том, что он позволяет оценить структуру радиоактивного загрязнения грунтов по результатам ГСИ в уже существующих скважинах.

5. Практическое применение предлагаемого метода для анализа структуры радиоактивного загрязнения грунтов, слагающих геологический разрез промплощадки объекта “Укрытие”, поможет более точно оценить удельную активность и объемы загрязненных грунтов и позволит организовать наблюдение за динамикой миграции радионуклидов из “активного” слоя под действием механизмов сорбции и десорбции.

Авторы выражают благодарность сотруднику ИЯИ НАН Украины А. Н. Берлизову за предоставленную возможность выполнить расчеты программой MCNP4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки на объекте “Укрытие” // Объект “Укрытие” - 10 лет. Основные результаты научных исследований. - Чернобыль, 1996. - С. 100 - 112.
2. Анализ имеющихся данных и изучение распределения и содержания радионуклидов в грунтах ближней зоны ОУ: (Отчет) / МНТЦ “Укрытие” НАН Украины. - Чернобыль, 1996.
3. Характеризация радиоактивных отходов, локализованных на промплощадке объекта “Укрытие”. Проект № в7-5200/97/000077/МАСЗ: (Отчет. Задача 5. Проведение измерений на промплощадке объекта “Укрытие”). - Чернобыль, 1998
4. Отчет по определению характеристик РАО западной зоны / Международный консорциум “Чернобыль” - ИСС (МК) JV, SIP Пакет А, дополнительные исследования, наряд на услуги № 4. Дополнение 1. - Киев - Чернобыль, 2002.
5. Правдивый А.А. Экспресс-контроль процессов миграции радиоактивных веществ при проведении буровых работ в локальной зоне объекта “Укрытие” // Проблемы Чернобиля. - 2003. - Вип. 13. - С. 148 - 150.
6. Калиновский А.К., Малюк И.А., Панасюк Н.И. и др. Использование результатов гамма-спектрометрических исследований при интерпретации данных гамма-каротажа скважин локальной зоны объекта “Укрытие” // Там же. - 2001. - Вип. 8. - С. 15 - 20.
7. Батий В.Г., Деренговский В.В., Кузьменко В.А. и др. Методика определения характеристик РАО промплощадки ЧАЭС // Наукові та технічні аспекти міжнародного співробітництва в Чорнобилі: Зб. наук. ст. Вип. 3. - Київ: Вища шк., 2001. - С. 550 - 558.
8. Калиновский А.К., Малюк И.А., Правдивый А.А. Исследование характеристик гамма-излучения ^{137}Cs на моделях скважин // Проблемы Чернобиля. - 2003. - Вип. 13. - С. 142 - 148.
9. Огородников Б.И., Павлюченко Н.И., Пазухин Э.М. Радиоактивные аэрозоли объекта “Укрытие” (обзор). Часть 1. Аэрозольная обстановка на промплощадке ЧАЭС при строительстве объекта “Укрытие”. - Чернобыль, 2002. - 47 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ “Укрытие”; 02-4).

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ
ПРОММАЙДАНЧИКА ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ" ^{137}Cs ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ****О. К. Калиновський, В. Г. Батій, О. А. Правдивий**

Розроблено метод аналізу структури забруднення ґрунтів за результатами спектрометричних досліджень гамма-випромінювання у свердловинах, що проходять через радіоактивно забруднені ґрунти. Для практичної реалізації цього методу було створено польовий спектрометричний комплекс і проведено необхідні вимірювання на експериментальних моделях свердловин по вивченню характеристик гамма-випромінювання. Запропоновано математичну модель свердловини для розрахунків за допомогою програми MCNP4, адекватну експериментальним свердловинам. Наведено результати практичного застосування методу для аналізу структури радіоактивного забруднення ґрунтів, що складають геологічний розріз локальної зони об'єкта "Укриття".

**DEVELOPMENT OF METHOD STRUCTURE DETERMINATION OF SOIL
CONTAMINATION BY ^{137}Cs OF OBJECT "UKRYTTYA" SITE UNDER
THE RESULTS OF GAMMA-SPECTROMETRIC INVESTIGATIONS****A. K. Kalynovsky, V. G. Batiy, A. A. Pravdyvyi**

Structure analysis method of soil contamination by ^{137}Cs under the results of spectrometric investigations of gamma-radiation in boreholes passing through radioactively contaminated soils was developed. For practical implementation, the field spectrometric complex was created and required methodical measurements were performed at experimental models as on study of gamma-radiation characteristics. Mathematical model of borehole was proposed adequate to experimental models for calculations using MCNP4 software code. The results of practical application during radioactive contamination structure analysis of soils making geological section of local zone of Object "Ukryttya" were stated.

Поступила в редакцію 17.12.04,
после доработки – 24.02.05.