

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ГАММА-КАРОТАЖА ПРИ АНАЛИЗЕ ИСТОЧНИКОВ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНОЙ СРЕДЫ

Н. И. Панасюк, А. Д. Скорбун, Н. И. Павлюченко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

По результатам совместного анализа общего и спектрометрического гамма-каротажа, проведенного в скважинах вокруг 4-го энергоблока ЧАЭС, выявлены области радиоактивного загрязнения грунтов ниже уровня доаварийной поверхности земли. Показано, что данные каротажа совместно с гидрогеологическими данными дают возможность разделять влияние потенциальных источников радионуклидов: загрязненного топливными частичками слоя грунта, высокоактивных блочных вод и др.

Введение

Для анализа радиоактивного загрязнения техногенных грунтов локальной зоны объекта "Укрытие" (4-й блок ЧАЭС) активно адаптируется метод гамма-каротажа. Можно считать установленным (см., например, [1, 2]), что вблизи 4-го энергоблока ЧАЭС строение слоев грунтов в разрезе имеет вид, схематически изображенный на рис. 1: в результате выпадения мелкодиспергированного топлива на поверхность земли верхний слой грунта оказался радиоактивно загрязненным и сформировал так называемый активный слой (зона II), гипсометрически приуроченный к доаварийной поверхности промплощадки ЧАЭС. Этот слой в процессе ликвидации аварии был сверху перекрыт щебнем, бетоном и т.п. (зона I). Под активным слоем по определению должны были бы остаться чистые грунты (зоны III и IV, которые соответствуют доаварийным техногенным и аллювиальным грунтам). Уровень

грунтовых вод расположен примерно на 4 м ниже подошвы активного слоя. На диаграммах гамма-каротажа активному слою соответствует интенсивный пик. Поэтому те положительные аномалии на диаграммах гамма-каротажа скважин локальной зоны объекта "Укрытие", которые находятся ниже основного пика и по глубине соответствуют расположению чистых грунтов, требуют специального анализа. Их необходимо анализировать совместно со всеми имеющимися данными, т.е. данными гамма-каротажа, геологических описаний, лабораторных анализов и др. Скважина 8180А может служить примером такого комплексного подхода к анализу данных гамма-каротажа. На рис. 1 приведены диаграммы гамма-каротажа, полученные в процессе контроля за бурением и в последующий период. Из материалов контроля за процессом бурения известно, что при бурении этой скважины было обнаружено ее загрязнение (перенос загрязненного грунта по стволу скважины в процессе бурения). Стенки и забой скважины начали чистить и в результате уровень загрязнения резко снизился (нижняя ветвь диаграммы гамма-каротажа).

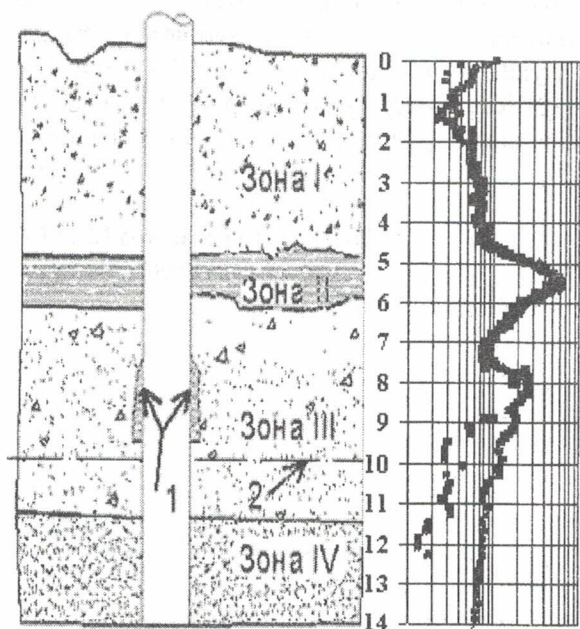


Рис. 1. Схематический техногенно-геологический разрез и диаграмма гамма-каротажа скважины 8180А (цифры на диаграмме – глубина от поверхности, м): 1 – интервал загрязнения ствола скважины при бурении; 2 – уровень грунтовых вод.

© Н. И. Панасюк, А. Д. Скорбун, Н. И. Павлюченко, 2005

Однако затем при подъеме труб и т.п. она опять оказалась загрязненной и осталась в таком состоянии (верхняя ветвь диаграммы гамма-каротажа), что подтверждается и данными гамма-спектрометрии. Неучет всего этого приведет к ложному заключению, что грунты ниже активного слоя сильно загрязнены.

Применение гамма-спектрометрии для оценки типа загрязнения основано на факте экспериментально наблюдаемой чувствительности соотношения между интенсивностями нерассеянного и рассеянного (комптоновского) излучения в спектре к пространственному распределению радионуклидов и химическому составу среды [3, 4]. В [5] анализируются возможности гамма-спектрометрии для определения загрязнения стенок скважин (поверхностное загрязнение) и учета этого при подсчете запасов радиоактивных отходов в грунтах на примере гамма-каротажа скважин, расположенных в районе контрфорсной стены объекта "Укрытие".

В настоящей работе предлагается использовать данный метод при анализе возможных источников загрязнения геологической среды в районе объекта "Укрытие" на глубинах существенно ниже активного слоя. Как следует из вышеизложенного, механизм образования такого загрязнения должен отличаться от механизма образования активного слоя.

Теория и эксперимент

Выше было показано, что для скважин локальной зоны возможно загрязнение стенок скважин (поверхностное загрязнение) в результате небрежного бурения. Для идентификации типа загрязнения (поверхностное или объемное распределение радионуклидов) был разработан метод, основанный на различии отношений интенсивностей в максимуме пика ^{137}Cs и в максимуме комптоновской части спектра, характеризующими поверхностное (K_n) и объемное (K_o) загрязнения. Эти коэффициенты зависят от многих факторов, в том числе от конструкции детектора, поэтому они не являются универсальными.

При изучении изменения спектра в различных геометриях измерений поверхностное загрязнение моделировалось путем размещения точечного источника вблизи стенки скважины. Казалось бы, что коэффициент (K_o) для объемного загрязнения следует получать в условиях бесконечной равномерно загрязненной среды. Однако оказалось, что это не так. В реальных условиях скважиной проходится активный слой мощностью 10 - 60 см, что существенно отличается от геометрии бесконечной среды. Кроме того, в поставленной задаче необходимо анализировать спектры, полученные на некотором расстоянии ниже активного слоя. Поэтому были изучены особенности определения искомых коэффициентов как в случае точечного источника, так и в геометрии активного слоя. В исследованиях и полевых измерениях использовался сконструированный с учетом необходимости работы в полевых условиях сцинтилляционный детектор на основе кристалла ВГО, имеющий стальной корпус с толщиной стенок в несколько миллиметров.

Объемное загрязнение. Данный тип отражает собственно радиоактивное загрязнение грунтов. Этот тип, в частности, характерен для активного слоя грунтов, сформировавшегося на доаварийной поверхности промплощадки ЧАЭС, в котором более-менее однородно распределены топливные частицы, выброшенные на окружающую территорию в процессе аварии. Для экспериментального определения K_o была использована имитирующая объемное загрязнение модель скважины с заданным размещением радиоактивного слоя грунта известной активности [6]. Исследования проводились для двух случаев: со стальной обсадной трубой и без обсадных труб. Результаты измерений приведены на рис. 2 (две верхних кривых - K_n , две нижних - K_o). Из рисунка видно, что с изменением расстояния по стволу скважины между детектором и активным слоем величина K_o заметно уменьшается, отличие достигает 30 %.

Поверхностное загрязнение в нашем случае означает наличие радионуклидов в тонком (1 - 2 см) слое грунта на стенках скважины. Для получения спектра, соответствующего такой геометрии, была использована модель скважины, аналогичная указанной выше,

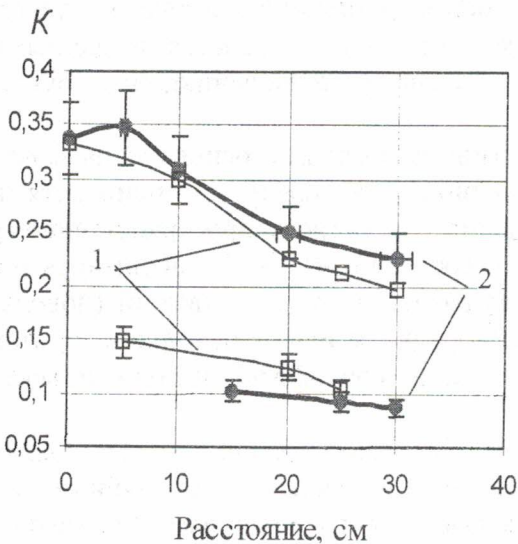


Рис. 2. Полученное на моделях скважин изменение коэффициентов K_0 и K_n в зависимости от расстояния между источником и детектором: 1 – с обсадной трубой; 2 – без обсадной трубы.

к тому, что в нем в первую очередь поглощается низкоэнергетическая компонента [3]. С ростом толщины экрана величина эффекта будет уменьшаться. В случае поверхностного источника доля нерассеянного излучения в приходящем на обсадную трубу спектре больше, поэтому становится заметным как поглощение, так и рассеяние прямого излучения в обсадной трубе. Практически это означает необходимость при анализе учитывать также конструкцию каждой конкретной скважины.

Нормированные и приведенные к одному масштабу калибровочные аппаратные спектры показаны на рис. 3, на котором видно их различие даже без числовых оценок: относительная интенсивность пика цезия в случае поверхностного загрязнения значительно больше.

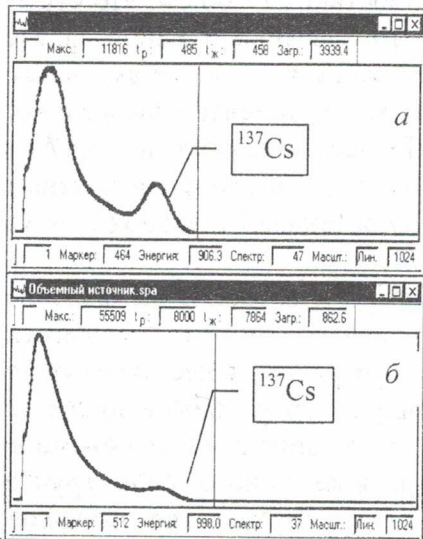


Рис. 3. Нормированные и приведенные к одному масштабу аппаратные спектры: от поверхностного (а) и от объемного (б) источников гамма-излучения.

но в которой отсутствует активный слой, а возле стенки обсадной трубы размещается точечный источник, который и имитирует поверхностное загрязнение. Здесь также возникают описанные выше эффекты – на разных расстояниях от источника спектр получается разным за счет роста вклада рассеянного излучения, хотя тип загрязнения остается поверхностным.

Отметим различное в случае поверхностного и объемного загрязнения влияние на величину K_0 и K_n обсадных труб: для объемного загрязнения K_0 при наличии обсадных труб увеличивается, а при поверхностном источнике K_n уменьшается. Этот на первый взгляд неожиданный эффект обусловлен тем, что в случае объемного загрязнения на детектор приходит рассеянное в среде (окружающих грунтах) излучение с характерным спектром, в котором значительную часть составляет низкоэнергетическое излучение. Установка обсадной трубы, представляющей собой защитный экран из вещества с более высоким эффективным атомным номером (железа) приводит

к тому, что в нем в первую очередь поглощается низкоэнергетическая компонента [3]. С ростом толщины экрана величина эффекта будет уменьшаться. В случае поверхностного источника доля нерассеянного излучения в приходящем на обсадную трубу спектре больше, поэтому становится заметным как поглощение, так и рассеяние прямого излучения в обсадной трубе. Практически это означает необходимость при анализе учитывать также конструкцию каждой конкретной скважины.

Нормированные и приведенные к одному масштабу калибровочные аппаратные спектры показаны на рис. 3, на котором видно их различие даже без числовых оценок: относительная интенсивность пика цезия в случае поверхностного загрязнения значительно больше.

Выбор коэффициента. Как видно из рис. 2, величина K зависит от геометрии эксперимента. С удалением от источника вклад рассеянного излучения в спектрах увеличивается и значения K_0 и K_n сближаются.

Аналогичный эффект наблюдается при удалении источника от поверхности обсадной трубы, что связано с тем, что при этом между источником и трубой возникает рассеивающий излучение слой грунта. Поскольку в реальной скважине загрязненная область затрубного пространства может составлять несколько сантиметров, то, соответственно, между определяющими поверхностное загрязнение радионуклидами и стенкой скважины окажется рассеивающий слой грунта, снижающий величину K_n , полученную в геометрии точечного источника, прижатого к поверхности обсадной трубы.

Как видно из рис. 2 и 3, крайние случаи чисто поверхностного и чисто объемного загрязнения уверенно различаются. Однако при наличии обоих типов

загрязнения будут формироваться промежуточные спектры, у которых K будет находиться между двух указанных выше калибровочных значений. Охарактеризовать конкретный спектр можно, оценивая отклонение Δ его коэффициента K от, например, K_0 : $\Delta = (K - K_0)/(K_n - K_0)$.

Очевидно, что получаемое отклонение будет зависеть от выбора значений K_0 и K_n . Из изложенного выше следует, что на измеряемый K будут оказывать влияние не только находящиеся напротив детектора, но и более удаленные слои грунта. Вносимая при этом неопределенность составляет приблизительно $\pm 15\%$. Точность расчета K , определенная как разброс полученных значений K при повторных измерениях одних и тех же спектров, составляет около $\pm 10\%$ для спектров с плохой статистикой. Таким образом, спектры, у которых отклонение от, например, K_0 составляет менее $\pm 20 \div 25\%$, можно считать полученными от преимущественно объемного источника. Для повышения точности и определения границ загрязнения по аналогии с гамма-каротажем следует определять изменение K с глубиной. Однако для поставленной задачи использованное приближение можно считать приемлемым.

Пример такого анализа спектров для скважины 7982 показан на рис. 4, где приведены диаграмма гамма-каротажа и спектры, полученные на указанных на них глубинах. Там же показан процент отклонения от K_0 . Как видно, отклонение от K_0 невелико, т.е. все спектры в диапазоне глубин 9 - 12 м свидетельствуют об объемном загрязнении грунта вокруг скважины. Следует отметить, что вышеприведенный интервал глубин приурочен к верхней части водоносного горизонта (зоны III и IV). При этом на глубинах 7 - 8 м, соответствующих необводненным грунтам, в этой скважине зафиксировано поверхностное загрязнение [5]. Приведенные на диаграмме (см. рис. 1) данные ряда измерений демонстрируют точность и воспроизводимость результатов гамма-каротажа скважин. Аналогичная картина получена и для расположенных рядом скважин 8178А и 8179 (рис. 5).

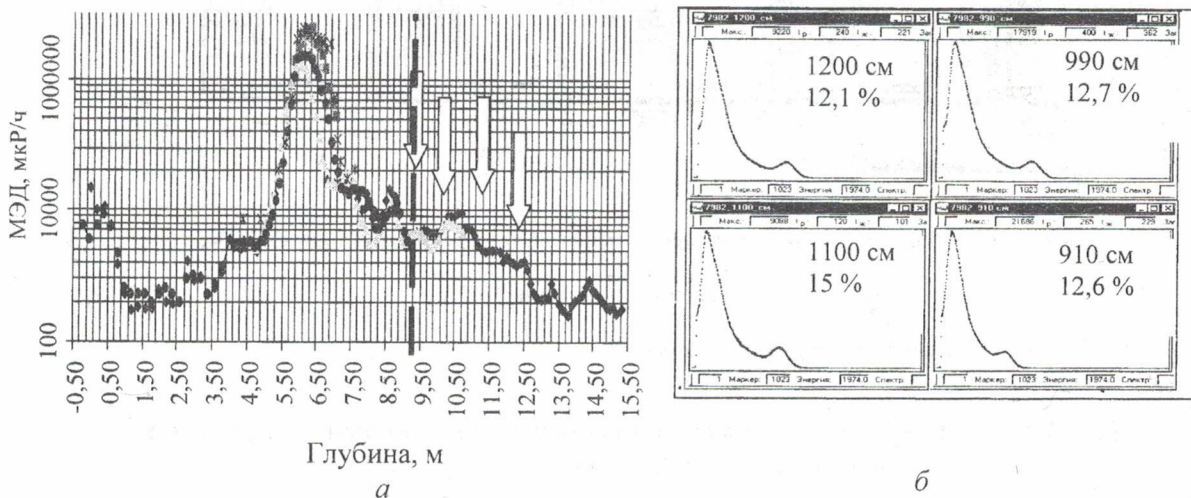


Рис. 4. Диаграмма гамма-каротажа (а) и спектры, полученные на указанных глубинах (б), для скважины 7982. Штриховой линией показан среднегодовой за 2004 г. уровень грунтовых вод.

По скважинам 9-1А, 9-3Д и скважинам куста 4-Г, расположенным севернее каскадной стены, объемное радиоактивное загрязнение грунтов фиксируется в зоне аэрации в интервале глубин на 2 - 3 м ниже подошвы активного слоя (зона III).

Обсуждение результатов

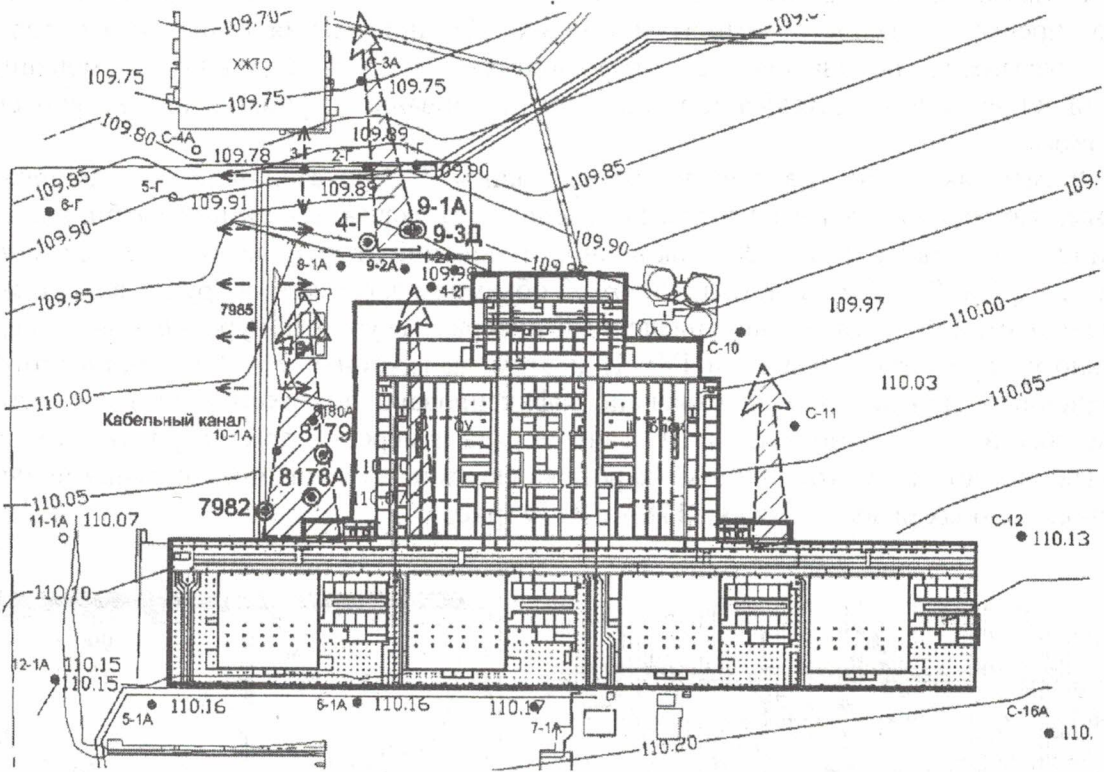
Единственным возможным объяснением наблюдаемого радиоактивного загрязнения грунтов на таких глубинах является сорбция грунтами радионуклидов из активных водных растворов, поступающих в грунты и подземные воды. По результатам радиогидрогеоло-

гического мониторинга объекта "Укрытие" потенциальными и существующими источниками загрязнения грунтов и грунтовых вод радионуклидами являются [1, 7]:

высокоактивные водные скопления в объекте "Укрытие", поступающие в геологическую среду;

инфильтрационные воды, проходящие через радиоактивно загрязненные грунты, растворяющие или выщелачивающие радионуклиды из активных слоев грунта и транспортирующие их в нижележащие первоначально "чистые" слои грунта и грунтовые воды;

активные водные скопления действующих или погребенных при аварии коммуникаций, поступающие в грунты и грунтовые воды преимущественно после ливневых дождей.



5-1А ● 110.16 Скважина, ее номер и абсолютная отметка уровня грунтовых вод, м;

110.10 Гидроизогипса и ее значение, м на июль 2002 г.

→ Направление распространения.

Рис. 5. Схема направлений влияния источников на радиоактивное загрязнение грунтовых вод в районе объекта "Укрытие".

На рис. 5 представлена схема гидроизогипс подземных вод в районе объекта "Укрытие", где широкими стрелками выделены участки предполагаемого выхода блочных вод за пределы объекта "Укрытие", выделенные на основании ореолов распространения в грунтовых водах трития, ^{90}Sr , ^{137}Cs и других химических элементов, характерных для блочных вод. Видно, что перечисленные выше скважины 7982, 8178А и 8179 с объемным радиоактивным загрязнением грунтов на глубине залегания уровня грунтовых вод и ниже расположены на одном из участков предполагаемого выхода блочных вод в окружающую среду. По нашему мнению, выявленное объемное радиоактивное загрязнение по этим скважинам представляет собой зону вторичного накопления радионуклидов в грунтах за счет сорбции из поступающих в грунтовые воды активных блочных вод. Тот факт, что выщележащие грунты в интервале между подошвой активного слоя и уровнем грунтовых вод в скважинах 7982 и 8178А в интервале глубин 7 - 9 м не имеют объемного радиоактив-

ного загрязнения, позволяет нам утверждать, что перенос радионуклидов сверху вниз с инфильтрационными водами на данном участке незначителен.

Как указывалось выше, по скважинам 4-Г, 9-1А и 9-3Д объемное загрязнение выявлено в интервалах глубин на 2 - 3 м ниже подошвы активного слоя. Учитывая, что на данном участке в процессе ликвидации аварии и в последующие периоды имелись предпосылки для концентрированного инфильтрационного питания, данный тип распространения радиоактивных материалов можно связать с сорбцией грунтами радионуклидов из инфильтрационных вод. Вместе с тем в интервале распространения грунтовых вод объемный тип радиоактивного загрязнения грунтов на данном участке определяется нечетко, хотя по результатам радиогидрогеологического мониторинга в грунтовых водах фиксируются признаки поступления блочных вод (на рис. 5 показаны широкими стрелками).

Кроме вышеприведенных путей распространения радионуклидов от источников в окружающую среду фиксируется объемный тип загрязнения грунтов, связанный с влиянием коммуникации, содержащей радиоактивные воды, по стволу скважины 8178А в интервале глубин 8 - 9 м (т.е. на 2 м выше уровня грунтовых вод). Проходка скважины через коммуникацию в данном интервале подтверждается визуально при описании вещественного состава и радиометрии керна скважины и по наличию "провала" инструмента при бурении.

Выводы

Рассмотренный метод анализа пространственного распределения радионуклидов с помощью спектрометрического гамма-каротажа, учитывая используемые приближения, следует считать полуколичественным. Во-первых, точность его невелика и, например, слабое поверхностное загрязнение на фоне сильного объемного или наоборот отличить будет сложно, особенно в случае плохой статистики. Во-вторых, в действительности для определения значения K в данной точке необходимо решать обратную задачу, аналогичную задаче гамма-каротажа. Тем не менее для крайних случаев - в основном объемного или в основном поверхностного загрязнения - его применение дает надежные результаты. В комбинации с другими данными в нашей ситуации это дает возможность анализировать источники поступления радионуклидов в среду и, как результат, обнаруживать миграцию и картировать зоны вторичного накопления радионуклидов за счет сорбции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасюк Н. И., Павлюченко Н. И., Рудько В. М. и др. Результаты работ по оценке радиоактивного загрязнения грунтов и подземных вод в районе объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2001. - Вип. 7. - С. 97 - 115.
2. Панасюк Н. И., Скорбун А. Д., Павлюченко Н. И. и др. Оценка свойств радиоактивных отходов в грунтах основания сооружения для обоснования проекта стабилизации объекта "Укрытие" // Там же. - 2003. - Вип. 13. - С. 120 - 126.
3. Коган Р. М., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред // М.: Энергоатомиздат, 1991. - 233 с.
4. Wilson R. D., Koizumi C. J., Dean S. H. Spectral gamma-ray calculations with an efficient and accurate radiation transport model // Twenty Sixth Annual Logging Symposium Transactions (Vol. 1), Society of Professional Well Log Analysts. Dallas, TX, June 1985, p. 7 - 8. Paper B.
5. Панасюк Н.И., Скорбун А.Д., Павлюченко Н.И. Применение спектрометрического гамма-каротажа для оценки радиоактивного загрязнения грунтов в локальной зоне объекта "Укрытие". - Чернобыль, 2003. - 12 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ "Укрытие"; 03-2).
6. Панасюк Н. И., Скорбун А. Д., Павлюченко Н. И. и др. Определение пересчетного коэффициента для гамма-каротажа скважин в условиях локальной зоны объекта "Укрытие" // Проблемы Чернобиля. - 2002. - Вип. 9. - С. 105 - 109.
7. Радиогидроэкологический мониторинг в районе объекта "Укрытие": (Отчет о НИР) / Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины. Научно-инженерный центр радиогидроэкологических полигонных исследований НАН Украины. - Киев, 2004.

ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО ГАММА-КАРОТАЖУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЖЕРЕЛ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНОГО СЕРЕДОВИЩА

М. І. Панасюк, А. Д. Скорбун, М. І. Павлюченко

За результатами спільного аналізу загального й спектрометричного гамма-каротажу, виконаного у свердловинах навколо 4-го енергоблока ЧАЕС, виявлено області радіоактивного забруднення ґрунтів нижче рівня доаварійної поверхні землі. Показано, що дані каротажу спільно з гідрогеологічними даними дають змогу розділяти впливи потенційних джерел радіонуклідів: забрудненого частинками палива шару ґрунту, високоактивних блочних вод тощо.

APPLICATION OF GAMMA SPECTROMETRIC LOGGING FOR IDENTIFICATION OF SOURCES OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF UNDERGROUND MEDIUM

M. I. Panasyuk, A. D. Skorbun, M. I. Pavlyuchenko

Using the results of the joint analysis of the bulk and spectrometric gamma logging, that have been carried out in boreholes around power Unit 4 of Chernobyl nuclear power plant, the regions of radioactive contamination of soils below the pre-accident level of the ground have been discovered. It was shown, that gamma-logging data in combination with hydrogeology data gives the possibility to distinguish the influence of potential sources of radionuclides. For instance, soils, contaminated by fuel particles, high active water from Unit 4, etc.

Поступила в редакцію 12.11.04,
после доработки – 25.02.05.