

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕДУРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ АНОМАЛИЙ

И. Ф. Лукашин

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул Капитанская, 2
E-mail: ouzi@alpha.mhi.iuf.net
tel/fax 8-0692-54-26-94

В работе анализируются сравнительные характеристики стандартного и корреляционного метода анализа флуктуаций поля гамма-излучения в формализме вероятностей обнаружения, ложных тревог и пропуска сигнала. Показано преимущество корреляционного метода на основе системного подхода к решению задачи обнаружения радиоактивных аномалий в среде.

Введение Экологический мониторинг полей радиоактивности окружающей среды предназначен для выработки и принятия исследовательских, административных, командирских и др. решений и представляет собой более или менее регулярное наблюдение, поиск, обнаружение и идентификацию появляющихся отличий в состоянии среды по сравнению с фоновым (в широком смысле) в поле радиоактивности. В этом процессе этап обнаружения – важнейший. В состав радиоактивного загрязнения среды всегда входят гамма-излучающие радионуклиды, которые удобны для оперативного обнаружения пятна загрязнения по проявлениям в поле гамма-излучения. Однако, задача эта сложна как в связи со спецификой гамма-поля, как квантового природного объекта, так и в связи со значительным природным фоном мешающего излучения. Так, если у поверхности земли годовая экспозиционная доза обусловленная фоном космической компоненты составляет ~ 300 мкзв, а радиоактивной ~ 1650 мкзв, то последняя у поверхности морской воды для открытых районов Мирового океана - ~ 1 мкзв.

Пятно радиоактивного загрязнения в среде со временем (в результате гидрофизических и различных биогеохимических факторов) увеличивается в размерах, дробится на более мелкие пятна, концентрация радионуклидов уменьшается,

кроме того сама радиоактивность распадается. Поэтому процесс обнаружения принципиально случайный, статистический.

Формализация этого факта для обнаружителя состоит в следующем: если в среде находится пятно загрязнения и обнаружитель, то последний может обнаружить сигнал, пропустить его или дать ложную тревогу. Суммарная вероятность этих событий составляет 1,

$$\text{т.е. } 1 = P_0 + P_{\text{пр.}} + P_{\text{л.т.}}$$

Процесс этот зависит от большого числа случайных процессов – гидрофизических, биогеохимических, ядернофизических, процессов регистрации излучения, поэтому подчиняется нормальному распределению. И представляется гауссовской кривой, нормированной на единицу, и разделенной вертикальными прямыми (a_1 и a_2) на три части, площади которых соответствуют обозначенным выше вероятностям. Средняя из них представляет собой вероятность обнаружения сигнала

$$P_0 = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{a_1}^{a_2} \exp\left(-\frac{N - \bar{N}}{\sigma}\right)^2 dN,$$

где σ - среднеквадратическое отклонение счетности N , \bar{N} - мат. ожидание. Хвостовые части – ошибки обнаружения, они связаны с неблагоприятными, по разным причинам, положительными

$$P^+ = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{a_1}^{\infty} \exp\left(\frac{N - \bar{N}}{\sigma}\right)^2 dN,$$

или отрицательными

$$P^- = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{a_2} \exp\left(\frac{N - \bar{N}}{\sigma}\right)^2 dN$$

флуктуациями регистрируемых гамма-обнаружителем счетностей. Левая соответствует вероятности пропуска сигнала (P^-), когда этой неблагоприятной флуктуацией маскируется сигнал, а правая – вероятности ложных тревог (P^+). По своей природе эти ошибки могут быть обусловлены тремя причинами: статистическими флуктуациями счетностей регистрируемых гамма-обнаружителем, вариациями концентраций гамма-излучателей радиоактивного фона среды и аппаратными погрешностями работы гамма-обнаружителя

$$P^{\pm} = P^{\pm}_{\text{ф.л. счетности}} + P^{\pm}_{\text{вар. фона}} + P^{\pm}_{\text{апп.}}$$

При решении задачи обнаружения радиоактивной аномалии используются стандартный и корреляционный методы [1] анализа флуктуаций интенсивности гамма-излучения.

Стандартный метод обнаружения состоит в выделении (аппаратно или программно) репрезентативных энергетических диапазонов в спектре излучения и счет в них событий за время экспозиции, таким образом получаются временные ряды счетностей. Статистика появления гамма-квантов в среде и их регистрации подчиняется закону нормального распределения с дисперсией равной математическому ожиданию счетностей

$$a_1 = a_2 =$$

$$N_{\text{сигнала}} / \sigma = \frac{\bar{I}_{\text{сигнала}}}{\sqrt{I_{\text{сигнала}} + I_{\text{фона}}}} \sqrt{\tau} \sqrt{D},$$

где τ - время экспозиции, D - линейные размеры детектора. Отсюда два важных заключения:

- эта ошибка симметрична относительно пропуска сигнала и ложных тревог;

- уменьшить ее можно двумя путями увеличением времени экспозиции или увеличением размеров детекторов, однако, первый способ малоэффективен ввиду того, что граница вероятности при этом сдвигается пропорционально корню из времени экспозиции, а второй потому, что стоимость детектора пропорциональна квадрату его линейных размеров.

Вторая причина ошибок требует изучения вариаций концентрационных характеристик поля радиоактивности среды в конкретных условиях измерения - обнаружения радиоактивных аномалий. Для условий обнаружения в океане можно использовать построенную в ОЯГФ МГИ НАН Украины более или менее адекватную модель гамма-фона океана [2]. Отметим, что эта ошибка обнаружения принципиально несимметрична относительно ложных тревог и пропуска сигнала. Так, ошибки в результате вариаций концентрации К-40 в поверхностном слое воды связанные с распреснением ее осадками вызывают дополнительный пропуск сигнала при решении задачи и не сказываются на увеличении ложных тревог.

Ключевым параметром третьей ошибки измерения являются СФД и характер отклика детекторов на концентрацию фоновых компонентов они получены в ходе натуральных экспериментов [3], которые заключались в выделении анализируемых компонент (калиевой и висмутовой) теми или иными аппаратными способами.

Эти данные позволили дать точные оценки параметров обнаружения стандартным методом. А именно, - для обнаружения вариаций солёности в 0,1‰ при времени экспозиции ~ 10 000 с вероятность обнаружения по ППП 1.46 мэв равна 0,24, по уровню дискриминации > 0,2 мэв - 0,64 и это не удовлетворительный результат. Для 40 000 с, соответственно, - 0,46 и - 0,81 и это предельно удовлетворительный результат. Однако, с точки зрения оперативности решения задачи обнаружения, они неудовлетворительны.

Поэтому требовался принципиально новый подход к задаче [4]. Основой такого подхода были подмеченные особенности спектрального состава гамма-излучения в однородной бесконечной среде с равномерно распределенными источниками [5]. Во-первых, рассеянное излучение в среде появляется в результате комптон-эффекта, образования электрон-позитронных пар и фото эффекта. Оказалось, что в среде на каждый первичный гамма-квант рождается 4 - 8 квантов более мягких энергий. Во-вторых, этот спектр излучения в среде появляется за $10^{-5} - 10^{-7}$ с, что значительно меньше времени экспозиции, поэтому обладает свойством синхронности появления. И, наконец, ряд радионуклидов, связанных с задачами обнаружения имеет каскадный спектр излучения с характерным временем излучения $10^{-7} - 10^{-9}$ с, т.е. обладает этим же свойством синхронности. Таким образом, введение параметра синхронности в фазовое пространство поля гамма-излучения может дать существенную прибавку информативности относительно задачи.

Вообще, в идеале, эта процедура представляется анализом событий в фазовом многомерном пространстве гамма-поля с адекватной формализацией свойств регистрируемого излучения.

Вариантом формализации была выбрана процедура корреляционной спектрометрии [6]. За короткие времена экспозиции регистрируются энергетические спектры

излучения в среде, набирается временной ряд спектров и производится подсчет элементов матрицы коэффициентов парных корреляций (МКПК).

Оказалось, что если применить к элементам этой матрицы преобразование Фишера [7], то элементы этой модифицированной матрицы обладают рядом замечательных свойств. Дисперсия этой величины не зависит от регистрируемых счетностей (как в случае стандартного метода), а зависит только от длины ряда. И это понятно, если учесть, что даже единичный факт синхронной регистрации событий в репрезентативных энергетических диапазонах спектра для исследуемой радиоактивной компоненты является определяющим для ее идентификации, как причины, обнаруженной флуктуации счетности.

Это означает, что надежные результаты можно получать при единичных загрузках, лишь бы в каналах спектрометра было зарегистрировано хотя бы одно событие. Это обстоятельство позволяет существенно сократить время экспозиции управляя выборкой с помощью нелинейного репрезентативного спектрометра. Максимальную информативность несет вся матрица коэффициентов парных корреляций и соответственно, ее модифицированный аналог – "фишеровская" матрица. Ее анализ с помощью той или иной системы распознавания образов имеет максимальную эффективность для решения задачи. Методы факторного анализа на основе обобщенного метода наименьших квадратов позволяет определить эффективную энергию флуктуаций радиоактивных компонент в составе флуктуаций гамма-фона. Этого достаточно для получения адекватного результата при решении задачи обнаружения загрязнения. Любой оперативный параметр - нагляден, но резко снижает эту эффективность ввиду того, что ограничивается рассмотрением только части элементов матрицы.

При этом в принятом формализме вероятностей обнаружения ситуация выглядит следующим образом:

-вероятность ошибок статистического характера ($P_{\text{фл. сч.}}^{\pm}$) - минимальна и управляема выборкой, создание нелинейного спектрометра [8] это решает;

-вариации фона ($P_{\text{вар фона}}^{\pm}$) – идентифицированы и определена их энергия флуктуаций;

-аппаратные ошибки ($P_{\text{апп.}}^{\pm}$) контролируются путем перекрестного поканального контроля статистической информации.

Заключение. Таким образом, введение еще одного параметра (измерения) фазового пространства гамма-поля - синхронности проявлений флуктуаций гамма-излучения в спектре, позволило существенно повысить чувствительность метода и на порядки сократить время экспозиции.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.Ф.Лукашин, Л.В.Воскресенская. Оперативные возможности корреляционной спектрометрии. доклады АН УССР. Серия Б. 1989г., № 6, -С.12-15.
2. Г.Ф.Батраков, И.Ф. Лукашин. Поле гамма-излучения океанов и морей. Севастополь, НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2005г., -258 с.
3. И.Ф.Лукашин, А.М.Винников. О собственном фоне детектора БДЭГ – 6931 – 20.- Атомная энергия, т. 55, вып.4, 1983, - С.255-256.
4. И.Ф.Лукашин., Т.В.Подварчан. Системный подход к мониторингу поля радиоактивности природных сред., в кн. " Системы контроля окружающей среды ", МГИ НАН Украины, Севастополь, 2002 г.,-С. 23 – 26.
5. И.Ф.Лукашин. Быстрое детектирование возмущений поля гамма-излучения.- " Морские гидрофизические исследования ", Севастополь, 1975, № 4, -С. 104 –111.
6. И.Ф.Лукашин, Л.В.Воскресенская. Метод идентификации флуктуирующего излучателя естественного поля гамма-излучения природных сред в условиях слабой статистической обеспеченности измерений. – Атомная энергия, 1987, т.62, вып. 6, -С. 404 – 405.
7. Уорсинг А. и Геффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. М., ИЛ, 1953, -348 с.
8. И.Ф.Лукашин Оперативные методы статистического анализа флуктуаций поля гамма-излучения морских сред., в кн. "Системы контроля окружающей среды", МГИ НАН Украины, Севастополь, 2002 г., - С. 29 – 32.