

ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФЛУКТУАЦИЙ ПОЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКИХ СРЕД

Лукашин И.Ф.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alha.mhi.iuf.net

Анализируются статистические параметры поля гамма-излучения морской воды с точки зрения возможностей оперативных методов обнаружения и идентификации флюктуационных параметров концентрационных характеристик.

Структура поля гамма-излучения природной среды обусловлена структурой полей концентраций гамма-излучающих радионуклидов имеющихся в ней.

Морские среды являются типичными неравнвесными термодинамическими системами, их концентрационные параметры формируются множеством случайных факторов, поэтому их математическое описание возможно только в рамках теории вероятностей и математической статистики. Имеется ряд работ, посвященных статистике гидро-метео-полей [2,6,5]. Этим закономерностям подчиняются и поля источников первичного излучения в среде – поля концентраций радионуклидов $\{q'_n(x, y, z)\}$, где x, y, z – пространственные координаты, t – время, n – индекс радионуклида.

Гамма-поле имеет дополнительную случайную составляющую, обусловленную природой радиоактивного распада ядер радионуклидов и процессов рассеяния и поглощения гамма-излучения на ядрах элементов среды.

Квантованием оператором $\langle \beta'_k \rangle$ по перечисленным выше аргументам осуществляется переход к энергетическому спектру первичного излучения в среде $\{a'_k(x, y, z)\}$ в выделенных энергетических интервалах (k – энергетический, t – временной дискретные индексы (номера)).

Интегро - дифференциальный оператор $\langle \alpha'_k \rangle$ преобразует спектр первичного излучения в среде в спектр рассеянного излучения или общий гамма-фон $\{N'_k\}$. Конкретный вид операторов α и β можно найти в работах по моделированию спектров рассеянного излучения в среде, например для морских сред в [7, 4]. Они (спектры) представляют собой число гамма-квантов находящихся в, тем или иным аппарат-

ным способом выделенном, об'еме фазового пространства гамма-поля

$$\{N'_k\} = \sum_{k,t} \langle \alpha'_k \rangle \{a'_k\}; \quad \{a'_k\} = \sum_{k,t} \langle \beta'_k \rangle \{q'_k\}.$$

Статистика $\{\beta\}$ -преобразования обусловлена вероятностным характером распада радиоактивных ядер, при этом физика распада предполагает, что:

- все атомы i -го радионуклида идентичны (вероятность распада в любом заданном интервале времени одинакова);
- все атомы независимы (распад одного не влияет на вероятность распада других);
- период полураспада атома много больше времени наблюдения – времени экспозиции (вероятность наблюдения распада одинакова для всех интервалов времени равной продолжительности);
- полное число атомов и полное число интервалов времени достаточно велико (рассматриваются только средние статистические величины)

Эти условия являются необходимыми и достаточными [1] для описания статистики $\{a'_k\}$ распределением Пуассона, по определению, т.к. формирование спектрального состава излучения обусловлено большим числом взаимодействий гамма-квантов с атомами среды.

Аналогичные рассуждения относительно характера взаимодействия гамма-кванта с ядрами атомов среды применимы и к статистическим характеристикам спектра рассеянного излучения в среде $\{N'_k\}$.

Таким образом, для них функция распределения имеет вид [8]:

$$P_r = \frac{\chi^r}{r!} \exp(-\chi),$$

где r и χ параметры распределений, соответственно, спектров первичного и рассеянного излучения. Для достаточно больших χ распределение хорошо аппроксимируется нормальным (гауссовским) распределением :

$$P_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{(\chi^2 - \mu^2)}{2\sigma^2}\right),$$

где μ и σ , соответственно, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение величины χ .

Распределение Гаусса описывает широкий круг случайных процессов. Это связано с утверждением, доказываемом в теории вероятностей о том, что случайная величина, являющаяся суммой очень большого числа независимых случайных величин, распределена по нормальному закону. Статистика $\{q'_k\}$ – распределение концентраций гамма-излучателей в морской воде

определяется параметрами гидрофизических процессов переноса радиоактивной примеси в океане. Как правило, для q'_k можно выделить фоновую и флюктуирующую независимые случайные составляющие по тому или другому индексу, $q_i = q_i^0 + q_i^{\text{фон}}$, таким образом, что $M(q_i) = M(q_i^{\text{фон}})$, $M(q_i^0) = 0$.

Величина $\{q'_k\}$ определяется вероятностью нахождения определенного числа атомов радионуклида в выделенном объеме фазового пространства гамма-поля и ее флюктуации несут информацию о параметрах гидрофизических процессов транспорта вещества в морской среде.

По определению, она имеет пуссоновское распределение и ее дисперсия равна

$$D(q'_k) = D(q_k^{\text{фон}}) + D(q_k^{0,0}).$$

Тогда, вводя производящие функции для распределений $\{N'_k\}$ и $\{\alpha'_k\}$ можно показать [9], что для фазового объема, определяемого параметрами оператора $\langle \beta'_k \rangle$

$$D(N) = \alpha^2 \beta^2 D(q) + q \alpha^2 D(\beta) + q \beta D(\alpha),$$

но отсюда

$$D(N) = \alpha^2 \beta^2 D(q^0) + D(N^{\text{фон}}),$$

где $D(N^{\text{фон}}) = \alpha^2 \beta^2 D(q^{\text{фон}}) + q \alpha^2 D(\beta) + q \beta D(\alpha)$, (индексы опущены) и отношение вкладов дисперсий гидрофизической и фоновой составляющих для N равно

$$\frac{D(N^0)}{D(N^{\text{фон}})} = \frac{\alpha^2 \beta^2 D(q^0)}{D(N^{\text{фон}})}, \quad \text{но т.к.}$$

$$D(N^{\text{фон}}) = M(N^{\text{фон}}) = M(\alpha)M(\beta)M(q),$$

то $D(N^0)/D(N^{\text{фон}}) = \alpha \beta q \delta_{q^0} = M(N^{\text{фон}}) \delta_{q^0}^2$

где δ - относительное среднеквадратическое отклонение. Это равенство отражает передаточные функции гамма-поля по отношению к флюктуациям концентрации радионуклидов, а именно: дисперсия гидрофизической составляющей пропорциональна объему фазового пространства ($\Delta V, \Delta t, \Delta E$) гамма-поля и квадрату относительного среднеквадратического отклонения концентрации радионуклида в среде.

Это выражение не трудно привести к виду

$$\sigma_{q^0} = \sigma_0 \frac{M(q^0)}{M(N^{\text{фон}})}. \quad \text{Это и есть}$$

решение обратной задачи. Из него следуют условия измерения параметров гамма-поля, а также его естественные ограничения по точности, чувствительности и обеспеченности процессов

обнаружения и идентификации флюктуаций концентрационных характеристик среды.

Таким образом, пространственно-временная структура поля гамма-излучения морских сред отражает структуру полей концентраций, содержащихся в них радионуклидов. Ярко выраженный квантовый характер гамма-поля, обусловленный природой радиоактивного распада ядер процессов рассеяния и поглощения излучения в среде, а также низкие концентрации радионуклидов, создают специфические трудности решения обратной задачи, связанные с дополнительной случайной составляющей параметров поля.

Соотношение интенсивностей ППП в энергетическом спектре излучения среды однозначно определяет состав смеси радионуклидов (гамма-излучателей) - компонентов гамма-поля. Идентификационные возможности метода измерения определяются его селективностью - величиной ошибки при разрешении двух соседних ППП в энергетическом спектре разделенных энергетическим интервалом ΔE или временных вариаций интенсивности ППП разделенных временными интервалом Δt , т.е. масштабов квантования гамма-поля прибором ($\Delta E, \Delta t$)

Регистрируемая прибором информация имеет ярко выраженный квантовый характер и представляет собой число зарегистрированных гамма-квантов в энергетическом диапазоне ΔE за время Δt

$$N_i^k = \sum_{\Delta E} \sum_{\Delta t} \varepsilon(E) I(E, t) \quad (*)$$

здесь k - временной, i - энергетический индексы, ε - эффективность детекторов. Поэтому критерием статистической обеспеченности измерений является выражение [8]

$$\Delta t \geq \alpha \sqrt{2 I \tau}, \quad (**)$$

здесь τ - время экспозиции, α - коэффициент, соответствующий установленному критерию значимости.

Следовательно, для повышение идентификационных возможностей метода или перехода к более мелким пространственно-временным масштабам необходимо увеличение числа элементов ФП поля, по которым происходит регистрация прибором и соответствующему увеличению времени экспозиции, необходимому для получения обеспеченной информации в них. В то же время, требование оперативного обнаружения флюктуации активности или состава компонент приводит к уменьшению времени экспозиции за счет соответствующего уменьшения числа элементов ФП поля - интегрированию счетностей по большему ФП, т.е. к потере информативности и селективности метода. С этой точки зрения, необходимо разделить задачу на две параллельные, т.е. ввести в

методику два принципиально разных, по способу сбора и обработки информации, измерительных канала, – обнаружения флюктуаций активности компонент и идентификации флюктуирующих компонент. Назначение первой из них – детектирование любого возмущения интенсивности гамма-поля и определение его временных (или пространственных) параметров. Система идентификации обеспечивает анализ ядерно-физических характеристик излучения и на этой основе осуществляет идентификацию причин этих возмущений. Соответственно, построение первой возможно на основе радиометрии излучения, второй – быстрой спектрометрии гамма-поля.

Способы повышения статистической обеспеченности измерений, т.е. разрешение эффектов всё более мелких масштабов, для той и другой системы существенно различны, как в части сбора и регистрации излучения (приборная часть), так и в плане обработки статистической информации. Поэтому техническая реализация измерительных каналов должна предусматривать оптимальные методы их построения обеспечивающие возможность детектирования и идентификации процессов в указанных выше пространственно-временных масштабах, т.е. необходим системный подход к созданию технических и программных средств измерения и обработки статистической информации.

Предположим, что радиометрический канал прибора регистрирует временной ряд счета детекторов N^k за время экспозиции τ и эта реализация содержит фоновый участок (1- k экспозиций) и участок с добавкой скорости счета (Δ), т.е. счетностью $N^k + \Delta$ длительностью j экспозиций с номерами ($k+1 - k+j$).

Наилучшей оценкой статистических параметров постоянной интенсивности является её значение полученное при сведении всех интервалов счета в один, это нетрудно показать методом максимального правдоподобия. Это означает, что мы не получаем никакой дополнительной информации о величине постоянной интенсивности, если кроме подсчета числа импульсов в заданном временном (или энергетическом) интервале определяем также и моменты (или точное значение энергии) их появления.

Т.е. наилучшей оценкой для постоянных интенсивностей в том и другом интервалах времени является сравнение величин

$$\sum_1^k N_i \quad \text{и} \quad \sum_{k+1}^{j+k} N_i .$$

Однако, такой процесс подразумевает наличие априорной информации о постоянстве интенсивностей, т.е. характере распределения флюктуаций активности во времени внутри выделен-

ных интервалов и о моменте начала возмущения – (номер $k+1$).

Естественно предположить, что для обнаружения эффекта возмущения необходимо накопить статистику внутри интервалов осреднения ($1-k$ и $k+1 - k+j$), а затем их сравнить, или напротив, накопить различия (перекрестные) между элементами этих интервалов. Операциями накопления могут быть сложение или умножение элементов ряда внутри выбранных интервалов, т.е. $\sum_1^k N^i$ или $\prod_1^k N^i$, операциями обнаружения различий реализаций являются вычитание и деление.

Для выбора оптимального способа выделения флюктуаций, – "обнаружение различий накопления" или "обнаружение накопленных различий" перебраны все возможные комбинации этих операций. Анализ показывает, что предпочтительным способом сравнения интенсивностей на реализациях следует считать операцию обнаружения делением накопленных суммированием статистик на этих реализациях

$$\sum N_k / \sum N_j .$$

Он предпочтителен также еще и потому, что при определении отношения двух интенсивностей выгоднее (с точки зрения статистической значимости) затрачивать больше времени на измерение меньшей активности [9], т.е. фона.

Действительно, относительная дисперсия вс-

личины $N_1 t_1 / N_2 t_2$ при $t_1 + t_2 = t$ имеет

$$\text{минимум при } t_1 / t_2 = 1 / \sqrt{A_1 / A_2}, \quad \text{т.е.}$$

наилучшим является такое соотношение, когда на измерение фона затрачивается большее время. Такая возможность, как правило, имеется.

Таким образом, наилучшим параметром, с точки зрения обнаружения флюктуации является выражение (*) по всему объему ФП, ограниченному сверху объемом среды, просматриваемой детекторами (по пространству), моментом времени завершения флюктуации (по времени) и энергией спада хвоста ППП монолинии общего гамма-фона.

Повышение обнаружительных способностей методики возможно за счет увеличения эффективного излучающего пространства среды (увеличения эффективного объема детекторов), снижения собственного фона детекторов (увеличение величины Δ), а также снижения вероятности пропуска сигнала электронными схемами прибора за счет возрастания их мертвого времени. Последняя причина достигает часто 15-30 % интегральной счетности излучения, это обстоятельство

приводит к необходимости создания в приборе специфического канала обнаружения обеспечивающего минимальные мертвые времена измерения, т.е. обеспечение счетного режима измерения без какой либо селекции излучения по элементам ФП гамма-поля.

Известный способ идентификации причины вариаций интенсивности гамма-поля состоит в выделении ППП (пика полного поглощения) радионуклида для достаточно длительных экспозиций Δt . Определение его площади за вычетом фоновой подложки для каждой экспозиции, тем или иным способом [3], характеризует среднюю активность изотопа. Выделение диапазона энергий ППП радионуклида осуществляется либо аппаратным либо алгоритмическим путем, критерием значимости флюктуаций служит зависимость типа (**). При этом необходима серия предварительных измерений для установления факта флюктуации именно этого радионуклида, т.е. нужна априорная информация об этом процессе и соответствующая перестройка методики измерения. Кроме того, для реальных морских сред время экспозиции для таких измерений, как мы уже отмечали, значительно превышает масштабы флюктуационных процессов интересующих исследователя.

В отсутствии такой априорной информации о составе флюктуирующих компонент процесс идентификации выглядит следующим образом. Пусть j -ый радионуклид равномерно растворенный в воде или, вообще говоря, j -ый компонент поля гамма-излучения имеет при-

борный спектральный отклик $\vec{\Phi}_j$, (это 2i-компонентный вектор - спектр общего и каскадного гамма-излучения). Тогда набор всех возможных излучателей j составляет матрицу откликов прибора $\|\vec{\Phi}\|$. Если $\vec{\Xi}$ - вектор собст-

венного фона детектора, то $\vec{\alpha} = \vec{\Xi} \times \|\vec{\Phi}\|$ представляет собой спектр собственного фона

детектора. Обозначив через $\vec{\beta}$ натурный спектр неизвестного набора излучателей $\vec{\Psi}$, можно записать выражение $\vec{\beta} = \vec{\alpha} + \vec{\Psi} \times \|\vec{\Phi}\|$ или

$$\vec{\beta} = (\vec{\Xi} + \vec{\Psi}) \times \|\vec{\Phi}\|,$$

откуда для излучения среды получаем выражение в виде

$$\vec{\Psi} = \vec{\beta} \times \|\vec{\Phi}\|^{-1} - \vec{\Xi}$$

или $\vec{\Psi} = (\vec{\beta} - \vec{\alpha}) \times \|\vec{\Phi}\|^{-1}$

Дифференцируя любое из последних выражений получаем уравнение для идентификации варьирующей компоненты и определения вкладов различных компонент в изменение интенсивности излучения

$$\vec{\Delta\Psi} = \vec{\Delta\beta} \times \|\vec{\Phi}\|^{-1}.$$

Статистические критерии значимости остаются теми же, что и (**), поэтому требование значительного снижения времени экспозиции наряду с сохранением достаточного для осуществления идентификации числа элементов ФП (быстрая спектрометрия излучения) означает привлечение других способов анализа спектрометрической информации, позволяющих снизить пороговые загрузки счета, обеспечивающие информативность его регистрируемых значений за короткие времена экспозиции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М., Атомиздат, 1970, с.559.
2. Казакевич П.С. Основы теории случайных функций и её применение в гидрометеорологии. Л., Гидрометеоиздат, 1977, с.318.
3. Калашникова В.И., Козодаев М.С. Детекторы элементарных частиц. М., "Наука", 1966,
4. Лукашин И.Ф. Быстрое детектирование возмущений поля гамма-излучения." Морские гидрофизические исследования ", Севастополь, № 4, с. 104 – 111.
5. Рожнов В.А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов. Л., Гидрометеоиздат, 1979, с.279.
6. Уорсинг А. и Геффнер Дж. Методы обработки экспериментальных данных. М., ИЛ, 1953, с.348.
7. Фано У., Спенсер Л., Бергер М. Перенос гамма-излучения. М., Госатомиздат, 1963, с. 282.
8. Худсон Д. Статистика для физиков. М., Изд. Мир, 1970, с. 296.
9. Яноши М. Теория и практика обработки результатов измерений. М., Мир,