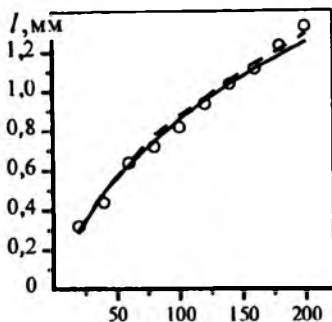


тых пластин, излучение направляли в место их стыка. После разъединения пластин анализировали форму и глубину полученного кратера. Схема пуска лазера позволяла плавно регулировать частоту следования импульсов, а также формировать серии импульсов с их фиксированным полным числом и частотой следования. Для математического описания этого процесса была использована модификация модели [6], которая учитывает нагрев образца, плавление, испарение и вытеснение расплава парами из зоны взаимодействия в зависимости от параметров лазерного излучения и свойств материала. Прямое использование одномерной модели [6] дает линейную зависимость глубины кратера от числа импульсов. Простейшая модификация модели построена на том экспериментальном факте, что при взаимодействии лазерного излучения с керамикой диаметр кратера не зависит от числа импульсов и равен диаметру пятна облучения $2r_0$. Поэтому уменьшение мощности, поглощаемой единицей поверхности, можно учесть перенормировкой интенсивности лазерного пучка $I = I_0 r_0 (h + r_0)$, где I_0 — интенсивность в пятне облучения при $h = 0$.



Число импульсов

Рис. 2. Зависимость глубины кратера I в керамике из Al_2O_3 (— — теория, $\bigcirc$ — эксперимент) и диоксида урана (--- — теория) от числа импульсов CO_2 -лазера

На рис. 2 сравнивается расчетная и экспериментальная глубина кратера в керамике из Al_2O_3 в зависимости от числа импульсов излучения. Хорошее соответствие теоретической и измеренной глубины кратера свидетельствует об адекватности математической модели реальным физическим процессам. Здесь же приведена теоретическая зависимость глубины кратера в диоксида урановом топливе при тех же параметрах лазерного излучения, что и для керамики из Al_2O_3 . Слабое отличие этих двух зависимостей позволяет использовать керамику из Al_2O_3 в качестве имитатора для планирования экспериментов и отработки методологии по воздействию излучения на топливо. С учетом того, что газовые продукты деления выходят из расплава за время, намного меньшее длительности импульса лазерного излучения, рассматриваемая методика в сочетании с диагностикой представляется перспективной для экспресс-анализа облученных материалов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 00-02-16161.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prater J., Courtright E. High-Temperature Oxidation of Zircaloy-4 in Steam and Steam-Hydrogen Environments. NUREG/CR-4476, 1986, PNL-5558.
2. Hiernaut J., Hyland G., Ronchi C. Premelting transition in uranium dioxide. — Intern. J. Thermophysics, 1993, v. 14, № 2, p. 259—283.
3. Косырев Ф.К., Копельович Д.Х., Кузьменко Т.Г. Перспективы повышения коррозионной стойкости сталей типа 18-10 методом поверхностной лазерной обработки. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология, 1989, вып. 5, с. 7—10.
4. Gilbert E., Chin B. Irradiated materials measurement technology. — In: Proc. of 10th Intern. Symp. «Effects of radiation on materials». Savannah, 1980, p. 665—679.
5. Дробязко С.В., Павлович Ю.В., Сенаторов Ю.М. Импульсно-периодический непрерывный лазер с накачкой импульсным самостоятельным разрядом для термической технологии. — Квант. электроника, 1985, т. 12, № 12, с. 2467—2470.
6. Allmen M. Laser drilling velocity in metals. — J. Appl. Phys, 1976, v. 47, № 11, p. 5460—5463.

Поступило в Редакцию 18.06.99

УДК 621.039.76

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ В СВЯЗИ С РИСКОМ И ДОЗОЙ

Пузанов Ю.В., Ожован М.И., Соболев И.А.
(МосНПО «Радон»)

Радиоэкологический мониторинг требует учета не только радиоактивного загрязнения, но и характеристик района контроля, в частности, плотности и численности населения. Это естественно, поскольку, если индивидуальная доза превысит установленные пределы для одного-двух человек, навряд ли в данном регионе проживания возникнут существенные последствия, связанные с отдаленными наследственными эф-

фактами. Другое дело, если даже умеренная доза распространится на весь массив людей региона. Тогда в предположении справедливости линейной беспороговой гипотезы при той же вероятности генетических и других последствий поток нежелательных отдаленных событий возрастет пропорционально числу людей. В этом, собственно, и состоит смысл использования понятия коллективной дозы, поскольку этот показатель прогнозирует потенциально возможное вредное воздействие на большой массив людей. Именно поэтому при организации радиационного мониторинга важно учитывать не только радиоактивное загрязнение, но и район его распространения. Указанные соображения послужили основой для формулирования цели настоящей работы — сравнить требования к системе радиационного контроля (мониторинга) для двух гипотетических районов с разным уровнем радиоактивного загрязнения и численностью населения.

Зависимость доза—риск. В соответствии с основополагающими документами [1, 2] в области относительно малой дозы предполагается линейная связь между риском R и дозой D

$$R = \alpha D, \quad (1)$$

где α — некий коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех районов, в которых есть радиационно опасные объекты, а также системы радиационного контроля.

Из формулы (1) следует вывод о том, что изменение дозовой нагрузки влечет за собой соответствующее изменение риска

$$\Delta R/R = \Delta D/D. \quad (2)$$

Эвристическая ценность соотношения (2) заключается в том, что оно остается справедливым при любом определении риска, связанного с некоторой дозой облучения.

Рассмотрим два района 1 и 2 с населением N_1 и N_2 соответственно, причем $N_1 \ll N_2$. Пусть средняя индивидуальная доза $D_1^* > D_2^*$, средняя коллективная доза $K_1^* < K_2^*$, причем

$$K_1^* = D_1^* N_1; \quad K_2^* = D_2^* N_2.$$

Результаты теоретического анализа позволяют предположить, что плотность распределения коллективной дозы $g(K)$ имеет вид функции, убывающей с ростом K [3]:

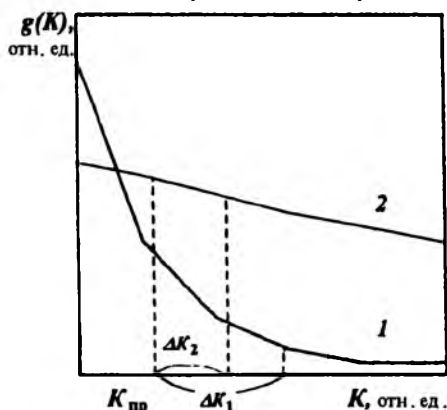
$$g(K) = \frac{mv}{\sqrt{2\pi}K^*} \int_0^\infty \frac{\exp(-K/xK^*)}{x} \exp\left(-\frac{(x-1)^2 v^2}{2}\right) dx, \quad (3)$$

где m, v — параметры распределения; K^* — средняя коллективная доза. Заметим, что основные выводы работы не зависят от явного вида распределения $g(K)$, они обусловлены именно его монотонно убывающим характером при $K \geq K^*$.

Статистический анализ выборки значений коллективной дозы по результатам индивидуального дозиметрического контроля на предприятии МосНПО «Радон» не противоречит приведенным рассуждениям. Поэтому представляется обоснованным предположение, что распределения $g_1(K)$ и $g_2(K)$ для произвольных районов 1 и 2 схематически выглядят так, как показано на рисунке. Согласно условию $K_1^* < K_2^*$ распределение $g_1(K)$ спадает быстрее, чем $g_2(K)$, при $K > K_2^*$.

В соответствии с НРБ-99 (п. 1.4) 1 чел.·Зв можно считать неким контрольным уровнем, при превышении которого источники становятся объектом внимания НРБ-99 и требуют регулярного радиационного контроля. Другое требование НРБ-99 (п. 2.5) гласит, что для радиационной безопасности необходимо поддерживать на возможно низком уровне индивидуальную дозу и число облучаемых лиц (принцип оптимизации). Для такой минимизации коллективной дозы следует ввести ее некий контрольный (или пороговый) уровень $K_{пр}$ с тем, чтобы можно было сравнивать наблюдаемую дозу. Согласно действующему законодательству [4, 5] такое сравнение необходимо проводить ежегодно, т.е. нужно анализировать годовую коллективную дозу. Величина $K_{пр}$ велика, во всяком случае $K_{пр} > 1$ чел.·Зв, что соответствует случаю $g_1(K) < g_2(K)$ при $K > K_{пр}$, как показано на рисунке.

Поскольку коллективная доза — величина случайная [3], то есть конечная вероятность превышения $K_{пр}$ на приращение ΔK . При этом исходя из принципа одинаковости радиационной безопасности для населения районов 1 и 2 необходимо, чтобы выполнялось неравенство $\Delta K_2 < \Delta K_1$. Это условие следует из того, что вероятности превышения предела $K_{пр}$ для жителей районов 1 и 2 должны быть одинаковыми. Таким образом, для одинаковой радиоэкологической комфортности жителей районов 1 и 2 необходимо, чтобы выполнялось условие



Плотность распределения коллективной дозы для районов 1 и 2

$$(\Delta K_2/K_{\text{нр}}) < (\Delta K_1/K_{\text{нр}}). \quad (4)$$

Изменение коллективной дозы ΔK можно представить в виде изменения индивидуальной дозовой нагрузки ΔD

$$\Delta K = N_{\text{ср}} \Delta D, \quad (5)$$

где $N_{\text{ср}}$ — средняя численность населения в данном районе. Тогда из уравнений (4), (5) следует, что для равной радиоэкологической комфортности должно выполняться неравенство

$$(\Delta D_2/D_2) < (\Delta D_1/D_1), \quad (6)$$

где $D_{1,2}$ — некие контрольные уровни, устанавливаемые в районах 1 и 2, причем должно выполняться условие $D_2 N_2 \gg D_1 N_1$, хотя возможно соотношение $D_2 < D_1$, как уже было упомянуто.

Из соотношений (2), (6) следует, что

$$(\Delta R_2/R_2) < (\Delta R_1/R_1), \quad (7)$$

где $R_{1,2}$ — некие уровни риска, характерные для жителей районов 1 и 2. Таким образом, для одинаковой радиоэкологической комфортности необходимо, чтобы относительное изменение риска при изменении дозовой нагрузки для жителей района 2 было меньше, чем для жителей района 1. Далее из неравенства (6) следует, что $(\Delta D_1/\Delta D_2) > (\Delta D_1/D_2) > 1$, поскольку по условию $D_1 > D_2$. Но $\Delta D_1 = \Delta R_1 D_1/R_1$ и $\Delta D_2 = \Delta R_2 D_2/R_2$ согласно равенству (2), откуда следует, что $(\Delta R_1/\Delta R_2)(D_1/D_2)(R_2/R_1) > 1$, и согласно соотношению (1) должно выполняться условие

$$\Delta R_2 < \Delta R_1.$$

Кроме того, из соотношения (1) и условия $D_2 < D_1$ следует, что должно выполняться неравенство

$$R_2 < R_1, \quad (8)$$

т.е. для равной радиоэкологической комфортности необходимо, чтобы риск для населения второго района был меньше, чем для жителей первого.

Зависимость риск — параметры системы радиационного контроля. Таким образом, совместное требование $K_1^* < K_2^*$ и $D_2 < D_1$ приводит к необходимости выполнения условий (7) и (8). Покажем, что оба эти условия ведут к повышению требований, налагаемых на систему радиационного контроля в районе 2. С этой целью отметим, что система радиационного контроля фактически представляет собой информационную часть защитной оболочки, обеспечивающей радиоэкологическую безопасность окружающей среды и населения [6, 7], а риск R — это потеря или отсутствие информации о фактическом радиоэкологическом состоянии данного района [8, 9]. Риск возрастает, если информационная оболочка, т.е. система радиационного мониторинга (контроля) действует неэффективно. Согласно данным [8, 9] количественно риск оценивается вероятностью пропуска сигнала о том, что фактическое содержание радионуклидов в объектах окружающей среды превышает установленные пределы, например, контрольный уровень мощности дозы. При таком толковании риска удается связать его численное значение с параметрами системы радиационного контроля [9] и обоснованно выбирать эти параметры. Эта зависимость дается в виде автомоделной функции $R = R(\xi_c, \chi, \chi_0, \lambda_c/\beta, \beta\tau, T/\xi_{\text{ш}})$ шести безразмерных величин, составленных из параметров системы радиационного контроля: ξ_c — среднеквадратичное отклонение логарифма амплитуды сигнала от среднего значения; χ, χ_0 — реализуемое и ожидаемое соотношение сигнал/шум; λ_c — поток сигналов; β — ширина полосы регистрации сигналов; τ — мертвое время системы контроля; T — порог регистрации сигналов (контрольный уровень); $\xi_{\text{ш}}$ — среднеквадратичное значение шума (помех).

Одной из важнейших задач при разработке системы радиационного контроля и мониторинга является выбор значений параметров, минимизирующих упомянутую функцию R . В частности, можно обосновать выбор такого порога регистрации T_0 , при котором обеспечивается минимум радиационного риска. При этом оказывается, что имеет место соотношение

$$(\lambda_c/\beta)_{\text{опт}} = \exp(-T_0^2/2\xi_{\text{ш}}^2), \quad (9)$$

где $(\lambda_c/\beta)_{\text{опт}}$ — оптимальное соотношение между потоком полезных сигналов о содержании радионуклидов в окружающей среде λ_c и полосой регистрации этих сигналов β , которой обладает данная система радиационного контроля [10]. Кроме того, данный район характеризуется контрольным уровнем T_0 и дисперсией шума $\xi_{\text{ш}}^2$ на фоне которого происходит обнаружение и выделение полезных сигналов. Заметим кстати, что параметры T_0 и $\xi_{\text{ш}}^2$ зависят также и от характеристик системы контроля, например, точности и объема измерений.

Требования к системе радиационного мониторинга и контроля. Модельное представление функционирования системы радиационного контроля и мониторинга в виде функции $R = R(\xi_c, \chi, \chi_0, \lambda_c/\beta, \beta\tau, T/\xi_w)$ позволяет анализировать риск в зависимости от параметров комплекса объект—система контроля. Из соотношения (9) следует, в частности, что если порог обнаружения уменьшится на ΔT оптимальной величины, то это приводит к увеличению потока информации:

$$\Delta\lambda/\lambda = - (T_0^2/\xi_w^2)(\Delta T/T_0). \quad (10)$$

Физический смысл соотношения (10) заключается в том, что с уменьшением порога контроля меньше оптимального резко возрастает частота появления регистрируемых малых значений мощности дозы, а это эквивалентно увеличению дозовой нагрузки со стороны малой дозы, так как хотя значения мощности дозы уменьшаются линейно, их частота согласно формуле (9) увеличивается экспоненциально. Относительное изменение вероятной дозы при этом пропорционально изменению частоты появления малых значений мощности дозы, т.е.

$$\Delta D/D = \Delta\lambda/\lambda = - (T_0^2/\xi_w^2)(\Delta T/T_0).$$

По оценкам отношение T_0/ξ_w может быть равно 2—10. Поэтому при уменьшении контрольного уровня всего лишь на 10% оптимальной вероятная доза может возрасти от 40% до 10 раз. В соответствующее число возрастет и радиационный риск согласно формуле (2). Отсюда следует, что для обеспечения неравенств (7) и (8) в районе 2 необходимо уменьшить оптимальный порог обнаружения полезных сигналов, сохранив при этом отношение $\Delta T/T_0$, т.е. следует обеспечить более жесткие требования к выбору контрольного уровня T_0 . Согласно формуле (9) при этом необходимо уменьшить полосу регистрации β или увеличить поток полезных сигналов λ_c в системе радиационного мониторинга района 2, что также ведет к ужесточению требований, налагаемых на эту систему. Согласно результатам [9] для уменьшения риска в соответствии с неравенством (8) от системы радиационного контроля во втором районе необходимо добиваться уменьшения реализуемого соотношения сигнал/шум χ , увеличения ожидаемого соотношения сигнал/шум χ_0 , уменьшения мертвого времени контроля τ . Все это связано с более жесткими требованиями, предъявляемыми к системе радиационного контроля, с ее совершенствованием.

Заключение. Таким образом, получен на первый взгляд парадоксальный вывод о том, что в районе 2, где по условию средняя индивидуальная доза меньше, чем в районе 1, требования к системе радиационного контроля оказываются выше. Казалось бы, наоборот, если дозовая нагрузка меньше, то и незачем усложнять систему мониторинга, достаточно, например, установить контрольный уровень такой же, как и в районе 1. Парадокс раскрывается, если учесть, что более низкие дозовые нагрузки в районе 2 связаны с меньшим содержанием радионуклидов в объектах окружающей среды, т.е. относительно малыми полезными сигналами, регистрируемыми данной системой контроля. А это требует более высоких качеств системы контроля, поскольку малые сигналы приходится регистрировать и выделять в условиях случайных помех, обусловленных фоновыми источниками ионизирующего излучения и другими видами помех.

В заключение отметим, что материалы данной статьи позволяют количественно различать радиологическую обстановку в двух районах, именно следует считать, что районы 1 и 2 имеют разное радиологическое состояние, если выполнены условия $K_1^* < K_2^*$; $D_2 < D_1$; $N_1 < N_2$; $\ln(K_1^*/K_2^*) < K_{np}(K_2^* - K_1^*)/(K_1^* K_2^*)$. Последнее приближенное соотношение следует из формулы (3) и условия $g_1(K_{np}) < g_2(K_{np})$, где K_{np} — пороговое значение или контрольный уровень годовой эффективной коллективной дозы; $g(K)$ — ее плотность распределения. При этих условиях к системе радиационного мониторинга (контроля), действующей в районе 2, предъявляются более высокие требования, чем к аналогичной системе в районе 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Commission on Radiological Protection. Recommendation of the Commission, 1990. ICRP, 1991, v. 21, № 1—3.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ-99. М., Минздрав РФ, 1999. 116 с.
3. Агриненко С.Д., Пузанов Ю.В., Проказова Л.М., Ожован М.И. Статистические характеристики коллективной дозы. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 3, с. 213—217.
4. Постановление Правительства РФ № 93 от 28.01.97 г. «О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий».
5. Постановление № 22 от 25.09.97 г. Главного государственного санитарного врача РФ «Об утверждении типовых форм радиационно-гигиенических паспортов».
6. Puzanov Yu.V., Sobolev L.A., Ojovan M.I. e.a. Long-term safety assessment for the radwaste disposal facilities. — In: Proc. ENS Topseal'99: Commitment to the Future Environment. Antwerp, Belgium, 10—14 Oct., 1999, v. 2, p. 329—333.

7. Пузанов Ю.В., Соболев И.А., Ожован М.И. и др. Методология оценки безопасности при обращении с радиоактивными отходами. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 6, с. 448—451.
8. Пузанов Ю.В. Альтернативная концепция риска. — Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 1992, вып. 3, с. 16—33.
9. Пузанов Ю.В. Автомодельные характеристики риска промышленных аварий. — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 5, с. 372—377.
10. Пузанов Ю.В. Оптимальное обнаружение предвестников катастроф. — Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 1999, вып. 5, с. 37—43.

Поступило в Редакцию 12.03.99

УДК 539.166

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ^{93m}Nb ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ

Буканов В.Н., Васильева Е.Г., Желтоножский В.А., Левченко А.А.,
Стрильчук Н.В., Чупов А.В.
(НЦ «Институт ядерных исследований» НАН Украины)

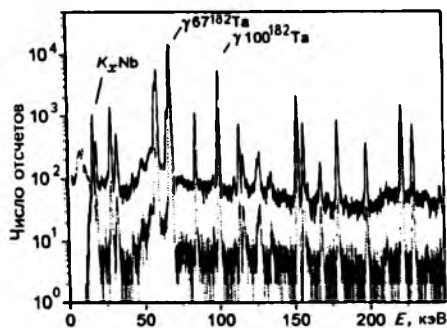
Реакцию $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93m}\text{Nb}$ используют для дозиметрии нейтронов [1]. Благодаря большому периоду полураспада образующегося изомера и низкому (~ 30 кэВ) порогу реакции совместно с другими реакциями ее можно использовать для восстановления потоков и спектров быстрых нейтронов и в конечном итоге для определения радиационной нагрузки на корпуса реакторов. Наряду с явными достоинствами использование этой реакции осложнено недостатками, основной из них — низкая ($\sim 10^{-5}$) интенсивность распада изомера ^{93m}Nb по γ -каналу. Поэтому активность ^{93m}Nb можно определить только по низкоэнергетическому (16 и 18 кэВ) характеристическому излучению или по еще более низкоэнергетическому спектру конверсионных электронов. Радиометрия ^{93m}Nb осложняется также тем, что в образце могут присутствовать другие радионуклиды, γ -излучение которых после фотоэффекта на матрице ниобия приводит к образованию K_x -излучения ниобия, как и в случае распада изомера. Различить эти процессы при обычных измерениях невозможно, что приводит к завышению активности ^{93m}Nb или необходимости его радиохимического выделения и связанным с этим ошибкам.

Нами предложен новый метод определения вклада фотоэффекта в K_x -излучение ниобия. Он основан на том, что радионуклиды, на фоне которых измеряют активность ^{93m}Nb , распадаются с излучением каскадных γ -квантов. Поэтому при фотоэффекте одного из γ -квантов каскада на атомах ниобия должны наблюдаться совпадения другого γ -излучения этого каскада с K_x -излучением ниобия, что можно зарегистрировать при использовании многодетекторного спектрометра или суммирования $\gamma + K_x$, которое можно измерить, применив однодетекторный спектрометр. Обработав спектры совпадений-антисовпадений или измерив интенсивность суммарных пиков, можно получить информацию о вкладе фотоэффекта в K_x -излучение ниобия и таким образом определить долю рентгеновского излучения, соответствующего распаду ^{93m}Nb .

Образец чистого ниобия, облученного на протяжении десятой топливной кампании на внешней поверхности реактора Хмельницкой АЭС, измеряли с помощью двух спектрометров — антикомптоновского фирмы CANBERRA и спектрометра, оснащенного детектором из сверхчистого германия с тонким бериллиевым окном, с использованием режектора наложений для подавления случайного суммирования. В образце, кроме ^{93m}Nb , выявлены ^{94}Nb и ^{182}Ta .

Для определения эффективности разделения фотоэффекта γ -излучения ^{182}Ta и ^{93m}Nb антикомптоновским спектрометром проведены измерения чистого фотоэффекта, когда на необлученный ниобий воздействовали γ -излучением ^{182}Ta . Спектры совпадений и антисовпадений представлены на рис. 1. Видно, что 89% K_x -излучения ниобия, обусловленного фотоэффектом, попадает в спектр совпадений.

На рис. 2 показаны спектры для образца облученного ниобия. Характеристическое излучение, соответствующее распаду ^{93m}Nb , находится в спектре антисовпадений, по-



Р и с. 1. Спектры совпадений (—) и антисовпадений (---) при измерении фотоэффекта γ -излучения ^{182}Ta на Nb