

Система поддержки дозиметрической интерпретации внутреннего облучения

Г.Г. Ратиа, Ю.В. Бончук

Научно-исследовательский институт радиационной защиты
Академии технологических наук Украины, Киев

Статья описывает компьютерную систему, разработанную для целей ретроспективной дозиметрии внутреннего облучения специалистами Научно-исследовательского института радиационной защиты АТН Украины. Система предоставляет инструментарий для анализа и интерпретации биофизических измерений, реконструкции поступлений и связанных с ними доз внутреннего облучения. Основной задачей системы является ретроспективная оценка доз внутреннего облучения от однократного или множественного поступления радионуклидов на основе данных измерений биопроб и СИЧ.

Ключевые слова: дозиметрическая интерпретация, внутреннее облучение, биопробы, ретроспективная дозиметрия.

Введение

Специалистами Научно-исследовательского института радиационной защиты АТН Украины разработана компьютерная система поддержки дозиметрической интерпретации внутреннего облучения. Система предоставляет инструментарий для анализа и интерпретации биофизических измерений, реконструкции поступлений и связанных с ними доз внутреннего облучения. Основной задачей системы является ретроспективная оценка доз внутреннего облучения от однократного или множественного поступления радионуклидов на основе данных измерений биопроб и СИЧ.

Исходными данными для системы являются временные тренды измерений на СИЧ содержания радионуклидов:

- во всем теле;
- в легких;
- в щитовидной железе;

а также данные измерений биопроб, позволяющие оценить:

- суточное выведение радионуклида с мочой;
- суточное выведение радионуклида с калом.

В качестве дополнительных исходных данных могут использоваться известные условия поступления:

- путь поступления;
- период времени, в течение которого могло произойти поступление;
- диапазон возможных размеров частиц аэрозоля при ингаляционном поступлении;
- возможные типы ингалированного материала (растворимость) при ингаляционном поступлении.

Система может рассматривать следующие пути поступления радионуклидов в организм человека: пероральный, ингаляционный, внутривенный, раневой, а также любую произвольную комбинацию этих путей поступления с указанием их вклада в суммарное поступление. При этом система позволяет анализировать как множественные однократные поступления, так и хроническое поступление радионуклидов в заданные периоды времени.

Интерпретационный метод

В основе интерпретационного метода лежит построение аппроксимации последовательности измерений линейной комбинацией функций отклика на единичное воздействие. Функцией отклика является функция содержания или выведения радионуклида после однократного единичного поступления в организм человека. Реконструкция уровней поступлений при этом может быть выполнена путем аппроксимации наблюдаемого набора измерений линейной комбинацией функций выведения с неизвестными значениями поступлений в качестве искомых параметров:

$$F_n(t) = \sum_{i=1}^n a_i R(t - \tau_i), \quad (1)$$

где $F_n(t)$ – функция, зависящая от времени t , аппроксимирующая набор последовательных n биофизических измерений;

n – количество проб, собранных за период времени $[0, t]$;

$R(t)$ – функция отклика на единичное воздействие (динамика содержания радионуклида в организме или в биопробах);

τ_i – время между i -м и первым поступлением;

a_i – величина i -го поступления.

Решение такой аппроксимационной задачи находится с помощью метода наибольшего правдоподобия. При этом, если предположить, что распределение отклонений значений идеальной (промоделированной) функции выведения от наблюдаемых измерений близко к нормальному, то аппроксимационная задача может быть сведена к решению минимизационной задачи по методу наименьших квадратов:

$$\min \sum_{k=1}^n (F_n(t_k) - M(t_k))^2, \quad (2)$$

где $M(t_k)$ – значение измерения k , выполненного в момент времени t_k .

или согласно формуле (1):

$$\min \sum_{k=1}^n \left(\sum_{i=1}^k a_i R(t_k - \tau_i) - M(t_k) \right)^2 \quad (3)$$

При решении приведенной в выражениях (2, 3) минимизационной задачи находятся n значений поступлений радионуклида a_i . Поиск значений a_i может выполняться последовательно в ходе итерационного процесса последовательного анализа временного тренда измерений. Для одного поступления и n последующих измерений, являющихся «откликом» на это поступление, минимизационная задача (3) примет вид:

$$\min \sum_{k=1}^n (aR(t_k - \tau) - M(t_k))^2 \quad (4)$$

При этом минимизационную задачу (4) можно решать относительно неизвестных величин поступления a и момента поступления τ , таким образом, не только оценивая величину поступления, но и уточняя момент поступления.

В общем случае, если в ходе мониторинга внутреннего облучения выполнено m измерений и последнее поступление предполагается на интервале мониторинга n ($n \leq m$), то минимизационную задачу (3) можно записать как

$$\min \sum_{k=n}^m [a_n R(t_k - \tau_n) - (M(t_k) - F_{n-1}(t_k))]^2 \quad (5)$$

где $F_{n-1}(t)$ – функция вида (1), построенная на предыдущих шагах итерационного процесса интерпретации биофизических измерений.

При этом, если момент поступления τ_n известен, то решение минимизационной задачи (5) относительно величины поступления a_n выражается следующей формулой:

$$a_n = \frac{\sum_{k=n}^m (M(t_k) - F_{n-1}(t_k)) \cdot R(t_k - \tau_n)}{\sum_{k=n}^m (R(t_k - \tau_n))^2} \quad (6)$$

В том случае, когда момент поступления τ_n неизвестен, решение минимизационной задачи (5) зависит от вида функции отклика $R(t)$. В общем случае, когда эта функция является результатом модельных расчетов, для решения минимизационной задачи (5) относительно неизвестных значений a_n и τ_n необходимо использовать соответствующие численные методы.

Реализация метода в виде компьютерной системы

Описанный интерпретационный метод реализован в виде компьютерной системы, ядром которой является библиотека функций отклика на единичное воздействие, рассчитанных с использованием современных биокинетических моделей МКРЗ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Структура библиотеки представлена на рисунке 1. В библиотеку включены функции содержания или выведения радионуклидов после однократного единичного поступления в организм человека. Отличительной особенностью библиотеки является способ хранения функций отклика на ингаляционное поступление. Эти функции хранятся в виде функций содержания или выведения радионуклида при единичном отложении этого



Рис. 1. Структура библиотеки функций отклика на единичное воздействие, используемой в компьютерной системе поддержки дозиметрической интерпретации внутреннего облучения

радионуклида в одном из отделов респираторного тракта. Такой способ хранения позволяет получать функции отклика на единичное ингаляционное поступление для произвольного аэрозоля с любым значением AMAD, используя линейную комбинацию хранимых функций и коэффициентов отложения в отделах респираторного тракта.

Кроме того, в библиотеку включены функции мощности дозы, соответствующие хранимым функциям отклика. Применяя интеграл свертки функций отклика из библиотеки с произвольной функцией поступления, можно получать функции удержания и выведения радионуклидов для предполагаемого поступления, в том числе хронического и смешанного. В состав библиотеки входят функции отклика и соответствующие эквивалентные и эффективные дозы внутреннего облучения для следующих радионуклидов: ^3H , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Tc , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{103}Ru , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{132}Te , ^{123}I , ^{125}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{201}Tl , ^{202}Tl , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{232}Th , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am .

Система позволяет выполнять анализ различных условий поступления, описываемых диапазонами значе-

ний параметров поступления, что дает возможность исследовать и выбирать комбинации параметров поступления, дающие наилучшую аппроксимацию наблюдаемых измерений. При этом анализируемые измерения и результаты аппроксимации модельными функциями отклика представляются в системе как в табличном, так и в графическом виде (рис. 2). Графическое представление анализируемых данных является интерактивным. Непосредственно на графике можно указывать группы измерений, представляющие отклик на одно и то же поступление, как исходные данные для следующего шага итерационного процесса анализа. Список реконструированных в ходе анализа вариантов поступления генерируется в соответствии с заданными диапазонами возможных параметров поступления. При этом среди вариантов поступления выделяется один, дающий наилучшее приближение наблюдаемых измерений.

Важной особенностью реализации системы является возможность одновременного анализа нескольких различных видов измерений (одновременная аппроксимация данных СИЧ, результатов измерений проб кала, мочи), что позволяет учесть весь доступный набор информации при оценке доз. В случае неизвестных условий

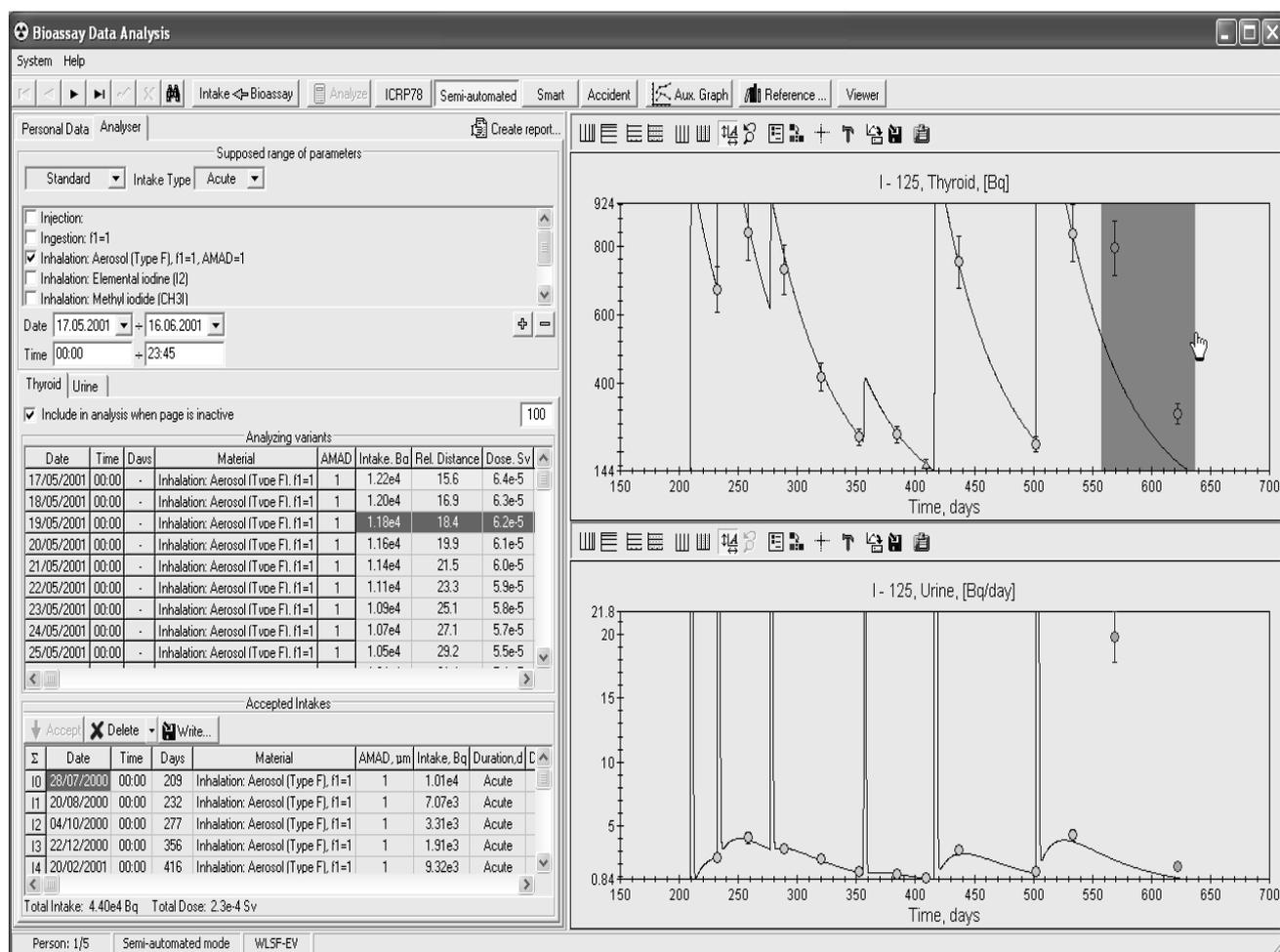


Рис. 2. Главное окно компьютерной системы в режиме одновременного анализа данных двух видов измерений (содержания ^{125}I в щитовидной железе и его выведения с мочой)

поступления могут быть заданы диапазоны возможных значений неизвестных параметров поступления и выполнен анализ всех возможных вариантов, при котором в качестве наиболее вероятного выбирается набор параметров, дающий наилучшую аппроксимацию наблюдаемых измерений. При этом система позволяет получить результаты по всем проанализированным вариантам условий поступления и выбрать в качестве приемлемого результата не только наиболее вероятный, но и, например, наиболее консервативный вариант, что зачастую является требованием органов государственного регулирования при оценке доз в случае неизвестных условий поступления.

Система может функционировать в одном из трех режимов:

- Ручной режим – на каждом шаге анализа эксперт задает интервал времени, на котором могло произойти поступление и указывает группу измерений, которые являются откликом на это поступление. После завершения расчетов эксперт выбирает восстановленное поступление из списка возможных вариантов, определяемых заданными диапазонами параметров поступления.

- Полуавтоматический режим – на каждом шаге анализа эксперт указывает группу измерений, которые являются откликом на восстанавливаемое поступление. Возможный период времени, на котором это поступление могло произойти, определяется автоматически. После завершения расчетов автоматически выбираются параметры поступления, дающие наилучшую аппроксимацию наблюдаемых измерений.

- Полностью автоматизированный режим – весь доступный набор биофизических измерений анализируется автоматически, определяется наиболее вероятное количество и время поступлений.

Результатами анализа являются:

- списки реконструированных поступлений с указанием всех сделанных в ходе анализа предположений об условиях поступления;

- ожидаемые эквивалентные дозы на органы и ткани, ожидаемая эффективная доза по каждому реконструированному поступлению, а также их суммарные значения за весь анализируемый период;

- графическое представление результатов аппроксимации значений наблюдаемых измерений модельными кривыми $F_n(t)$.

Вся исходная информация и полученные в ходе анализа результаты сохраняются в специализированной базе данных по каждому обследованному человеку, что позволяет в дальнейшем просматривать полученные результаты и выполнять повторный анализ при поступлении новых исходных данных.

Кроме того, в систему включена возможность прямого расчет доз на основании результатов измерений содержания трития во всем теле и в моче, а также содержания цезия во всем теле. Интегральное количество распадов в теле оценивается путем интегрирования наблюдаемых измерений. Ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения рассчитывается как произведение интегрального количества распадов на соответствующее значение удельной эффективной энергии.

Заключение

Рассматриваемая система облегчает процесс восстановления поступлений на основе данных СИЧ, биопроб и данных об условиях поступлений (таких, как дата поступления, путь поступления, AMAD и тип материала аэрозоля в случае ингаляционного поступления). Более того, компьютерная система позволяет выполнять оценку неизвестных условий поступления. Для этой цели неизвестные параметры поступления могут быть заданы в виде предполагаемых диапазонов значений. Программа проанализирует все комбинации параметров из заданных диапазонов и найдет тот набор условий поступления, который обеспечивает наилучшее приближение анализируемого набора измерений. Однако решение ретроспективной задачи в таком случае очень часто бывает неоднозначным, так как несколько различных вариантов аппроксимации оказываются достаточно близки к анализируемым измерениям. Чем шире диапазон неизвестных параметров, тем большей может быть неопределенность получаемого результата. Программа при решении ретроспективной задачи не может дать абсолютно верного решения. Выбор окончательного результата остается за экспертом, выполняющим анализ. Компьютерная система предоставляет лишь удобный инструмент, позволяющий опытному эксперту быстро выполнить анализ и сравнение возможных вариантов поступления, и принять решение о наиболее достоверном результате. Реконструкция момента поступления дает достаточно надежную оценку, если известны все прочие условия поступления. Реконструкция размеров частиц ингалированного аэрозоля, как правило, затруднена из-за близости форм функций биокинетического отклика на ингаляцию аэрозолей с различным AMAD. В случае, когда полностью отсутствуют данные об условиях поступления, получение надежной ретроспективной оценки поступлений затруднительно.

Еще одна очевидная проблема, усложняющая ретроспективный анализ, возникает при недостаточном количестве данных измерений или слишком большом промежутке времени между поступлением и началом сбора проб (выполнения измерений). Крайним случаем является наличие всего одного измерения. В этом случае возможна оценка лишь величины поступления, а все остальные условия поступления должны быть известны или предполагаться.

Таким образом, система поддержки дозиметрической интерпретации внутреннего облучения представляет собой удобный вспомогательный инструмент для анализа и интерпретации биофизических измерений при решении задач ретроспективной дозиметрии. Описанная система используется в профильных научных институтах Германии, Испании, Израиля, Южной Кореи.

Литература

1. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 // Annals of the ICRP: Part 1. Oxford: Pergamon Press, 1979. 134 p.
2. Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38// Annals of the ICRP. Oxford: Pergamon Press, 1983. 210 p.
3. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66 // Annals of the ICRP. Oxford: Pergamon Press, 1994. 482 p.

4. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. ICRP Publication 67 // Annals of the ICRP: Part 2. Oxford: Pergamon Press, 1993. 166 p.
5. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. ICRP Publication 69 // Annals of the ICRP: Part 3. Oxford: Pergamon Press, 1995. 74 p.
6. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. ICRP Publication 71 // Annals of the ICRP: Part 4. Oxford: Pergamon Press, 1995. 405 p.
7. Cristy M., Eckerman K. F. Specific Absorbed Fraction of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 1987. 120 p.

G. Ratia, Iu. Bonchuk

Support System for the dosimetric interpretation of the internal exposure

Radiation Protection Institute of Academy of Technological Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. Paper describes the computer system, which was developed for the purposes of the retrospective dosimetry of internal exposure by specialists of the Radiation Protection Institute of Academy of Technological Sciences of Ukraine. The system gives tools for analysis and interpretation of biophysical measurements, for reconstruction of intakes and related doses of the internal exposure. The main aim of the system is retrospective estimation of the doses of internal exposure from single acute or multiple intakes of radionuclides on the base of the bioassay and whole body counter measurements.

Key words: *dosimetric interpretation, internal exposure, bioassay, retrospective dosimetry.*

Поступила 29.12.2008 г.

Г.Г. Ратиа
Тел. (факс): (8-10-380-44) 489-10-27;
E-mail: ratia@rpi.kiev.ua