

АППРОКСИМАЦИЯ РАДИАЛЬНОЙ ДОЗОВОЙ ФУНКЦИИ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ БРАХИТЕРАПИИ НА ОСНОВЕ РАДИОНУКЛИДА ИРИДИЯ-192

А.В. Белоусов¹, А.С. Осипов¹, А.А. Калачев¹, А.П. Черняев^{1,2}

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

² НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Представлена улучшенная функциональная форма для аппроксимации радиальной дозовой функции закрытых источников для брахитерапии на основе нуклида ¹⁹²Ir. Предложенные функции позволяют точно аппроксимировать радиальную дозовую функцию в диапазоне 0,5–20 см. Максимальные отклонения между данными аппроксимации и данными моделирования по методу Монте Карло не превышают 0,6 %, тогда как средние отклонения составляют порядка 0,1 %. Коэффициенты аппроксимации предложенных функций приводятся для 11 источников различных производителей. Предложенные функции подходят для применения в системах планирования с целью более точного вычисления распределений дозы вокруг источников с использованием широкого диапазона данных согласно протоколу TG-43.

Ключевые слова: брахитерапия, ¹⁹²Ir, радиальная дозовая функция, функции аппроксимации

Введение

При расчете распределения поглощенной дозы возле брахитерапевтического источника многие коммерческие системы планирования обращаются к функциональным зависимостям, полученным в результате аппроксимации набора значений так называемой радиальной дозовой функции. Этот набор данных может быть определен как в результате экспериментальных дозиметрических исследований, так и получен с помощью компьютерного моделирования. Протокол рабочей группы AAPM TG-43 [1] рекомендует использовать для аппроксимации полиномы третьего – пятого порядков в форме

$$g(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5. \quad (1)$$

Коэффициенты аппроксимации доступны в научной литературе для большого количества используемых в настоящее время источников. Хотя точность полиномов пятого поряд-

ка и достаточна для аппроксимации и интерполяции радиальной дозовой функции в области $0,5 \text{ см} \leq r \leq 20 \text{ см}$, качество аппроксимации резко падает при выходе за пределы этого диапазона. Кроме того поведение функции “не физично” вне данного диапазона. Это проявляется вследствие наличия большого количества минимумов и максимумов.

Разные авторы предлагали множество альтернатив полиномам, включая сумму 2 экспонент [2]

$$g(r) = a_0 e^{-a_1 r} + a_2 e^{-a_3 r}, \quad (2)$$

Moss [3] предложил использовать модифицированную сигмоидальную функцию:

$$g(r) = a_0 (a_1 + e^{-a_2(r-a_4)} / a_1 + e^{-a_2(r-a_4)} + e^{-a_3(r-a_4)}), \quad (3)$$

а Meigooni [4] предложил модифицировать полином экспоненциальным множителем:

$$g(r) = (a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5) e^{-a_6 r}. \quad (4)$$

Все перечисленные выше функции, хотя и позволяют более точно аппроксимировать данные, тем не менее, не всегда точно описывают поведение радиальной дозовой функции при малых расстояниях от источника, что особенно критично в случае источников с радионуклидами ¹²⁵I и ¹⁰³Pd.

Выражение (2) имеет некоторый физический смысл, если предположить, что спектр фотонов, испускаемых радионуклидом, состоит из двух главных линий, что справедливо для нуклида ⁶⁰Co. Для более точного учета быстрого изменения радиальной дозовой функции на малых расстояниях от источника можно использовать модификацию выражения (4) в виде:

$$g(r) = (a_0 r^{-1} + a_1 + a_2 r + a_3 r^2 + a_4 r^3) e^{-a_6 r} \equiv P_{-1,3} \times \exp, \quad (5)$$

или в виде [5]:

$$g(r) = (a_0 r^{-2} + a_1 r^{-1} + a_2 + a_3 r + a_4 r^2 + a_5 r^3) e^{-a_6 r} \equiv P_{-2,3} \times \exp, \quad (6)$$

или

$$g(r) = (a_0 r^{-1} + a_1 + a_2 r + a_3 r^2 + a_4 r^3 + a_5 r^4) e^{-a_6 r} \equiv P_{-1,4} \times \exp. \quad (7)$$

Все выражения подобраны таким образом, чтобы количество параметров аппроксимации не превышало 7.

В настоящей работе авторами рассчитана радиальная дозовая функция источника BEBIG Ir2.A95-2, выполнена аппроксимация по формулам (1) и (4-7) данного источника и еще 10 источников, содержащих в качестве радионуклида ¹⁹²Ir, также выполнено аппроксимация полиномом 6 порядка и функцией Гаусса.

Материал и методы

Промышленно выпускаются два типа источников, применяемых для контактного облучения (брахитерапии), содержащих в качестве активного вещества ¹⁹²Ir. Первый тип характеризуется плавно возрастающим значением радиальной дозовой функции до максимума на расстоянии 1 см от источника (рис. 1а), второй тип – убыванием дозы с расстоянием при малых значениях r (рис. 1б). К первому типу относятся источники BEBIG G1192M11, Flexisource, Gammamed 12i, Gammamed plus, Microselectron V1 и V2, SPEC M19, VariSource classic и VarySource VS200, ко второму типу – BEBIG Ir2.A95-2 и Buchler G0814. Значения радиальных дозовых функций источника BEBIG Ir2.A95-2 получены авторами [6] и взяты из работы [7], для всех остальных источников данные взяты из базы данных Карлтонского университета [8].

Во всех случаях аппроксимация выполнена нелинейным методом наименьших квадратов с помощью пакета OriginPro. Качество аппроксимации оценивалось по двум критериям: по погрешности коэффициентов аппроксимации, и по средним и максимальным отклонениям результатов аппроксимации от табулированных данных, согласно выражениям:

$$R_i = |(g_{fit}(r_i) - g_{data}(r_i)) / g_{data}(r_i)|, \quad (8)$$

$$\langle R \rangle = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N R_i^2}, \quad (9)$$

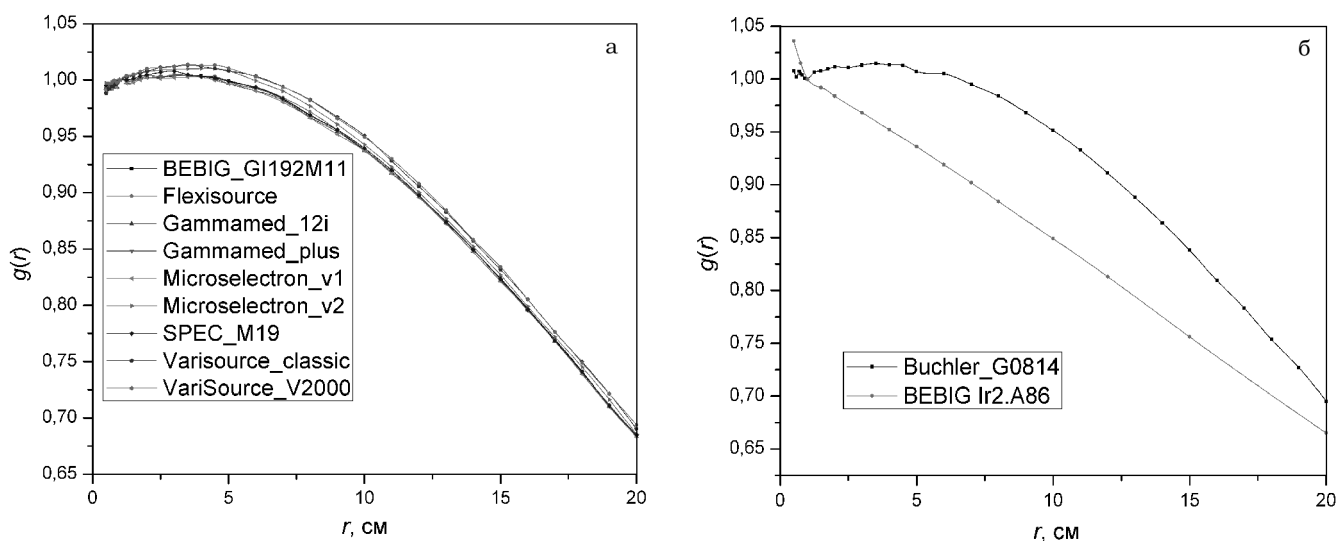


Рис. 1. Радиальная дозовая функция брахитерапевтических источников первого (а) и второго (б) типов

где $g_{fit}(r_i)$ – результат вычисления функции аппроксимации в точке r_i , а $g_{data}(r_i)$ – значение табулированных данных в той же точке. Для каждой функции аппроксимации выполнено в диапазоне $0,5 \text{ см} \leq r \leq 20 \text{ см}$.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 приводятся данные о качестве аппроксимации (среднее и максимальное

отклонения) радиальных дозовых функций источников по выражениям (1) и (4–7), качество аппроксимации оценивается согласно выражениям (8) и (9). Параметры аппроксимации для оптимальных выражений приводятся в табл. 3.

Как видно из табл. 1, наилучшие результаты для радиальных дозовых функций источников первого типа дает аппроксимация по формулам (5)–(7). Для источников второго типа более качественна аппроксимация по формулам (6) и (7). В целом для исследуемых источни-

Таблица 1

Результаты аппроксимации для источников первого типа

Источник	P_3		P_4		P_5		P_6		Гаусс	
	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$
BEBIG GI192M11	0,29	0,08	0,28	0,07	0,28	0,09	0,28	0,08	0,27	0,08
FlexiSource	0,35	0,10	0,26	0,07	0,24	0,07	0,36	0,09	0,24	0,07
Gammamed 12i	0,41	0,11	0,41	0,11	0,41	0,12	0,40	0,10	0,40	0,10
Gammamed plus	0,33	0,08	0,32	0,07	0,32	0,09	0,31	0,07	0,31	0,07
Microselectron V1	0,42	0,11	0,41	0,10	0,41	0,11	0,41	0,09	0,41	0,09
Microselectron V2	0,26	0,08	0,21	0,07	0,15	0,06	0,19	0,07	0,39	0,10
SPEC M19	0,33	0,11	0,34	0,10	0,30	0,10	0,27	0,08	0,36	0,09
VariSource Classic	0,41	0,11	0,39	0,10	0,41	0,12	0,27	0,09	0,54	0,14
VariSource V2000	0,22	0,08	0,23	0,07	0,29	0,09	0,23	0,07	0,25	0,08

Продолжение

$P_3 \times \text{exp}$		$P_4 \times \text{exp}$		$P_5 \times \text{exp}$		$P_{-2} \times \text{exp}$		$P_{-1,3} \times \text{exp}$		$P_{-1,4} \times \text{exp}$	
$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$
0,28	0,07	0,28	0,08	0,26	0,08	0,22	0,07	0,22	0,07	0,22	0,07
0,24	0,07	0,24	0,07	0,22	0,07	0,21	0,07	0,25	0,07	0,20	0,07
0,41	0,10	0,41	0,10	0,39	0,09	0,33	0,10	0,33	0,10	0,33	0,10
0,32	0,07	0,32	0,07	0,30	0,06	0,27	0,06	0,26	0,07	0,26	0,06
0,41	0,09	0,41	0,09	0,40	0,09	0,37	0,09	0,38	0,09	0,38	0,09
0,26	0,07	0,17	0,07	0,15	0,06	0,22	0,06	0,21	0,07	0,16	0,07
0,31	0,10	0,31	0,10	0,26	0,08	0,25	0,09	0,27	0,10	0,27	0,10
0,36	0,10	0,36	0,10	0,19	0,08	0,18	0,07	0,18	0,08	0,19	0,07
0,23	0,10	0,23	0,08	0,23	0,07	0,21	0,08	0,21	0,08	0,21	0,08

Таблица 2

Результаты аппроксимации для источников второго типа

Источник	P_3		P_4		P_5		P_6		Гаусс	
	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$
Buchler G0814	0,65	0,17	0,56	0,14	0,55	0,13	0,54	0,14	0,58	0,13
BEBIG Ir2.A95-2	1,21	0,18	0,88	0,14	0,55	0,10	3,62	0,25	1,51	0,20
BEBIG Ir2.A95-2	1,64	0,20	1,28	0,18	0,96	0,15	3,99	0,30	1,85	0,19

Продолжение

$P_3 \times \text{exp}$		$P_4 \times \text{exp}$		$P_5 \times \text{exp}$		$P_{-2} \times \text{exp}$		$P_{-1,3} \times \text{exp}$		$P_{-1,4} \times \text{exp}$	
$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$	$R_{\max},\%$	$\langle R \rangle,\%$
0,55	0,13	0,52	0,12	0,52	0,13	0,40	0,11	0,40	0,11	0,40	0,11
0,94	1,41	0,30	0,07	0,30	0,07	0,20	0,03	0,22	0,03	0,19	0,03
0,14	0,19	0,76	0,12	0,76	0,12	0,28	0,03	0,32	0,04	0,27	0,03

Таблица 3

Значения параметров аппроксимации*

Источник	$a_0 \times 10^{-3}$, см	$a_1 \times 10^{-1}$	$a_2 \times 10^{-2}$, см ⁻¹	$a_3 \times 10^{-3}$, см ⁻²	$a_4 \times 10^{-4}$, см ⁻³	$a_5 \times 10^{-7}$, см ⁻⁴	$a_6 \times 10^{-1}$, см ⁻¹
BEBIG	-4,03	9,96	12,40	7,04	1,26	0	1,18
GI192M11	4,08	9,97	97,20	4,19	-0,31	-4,18	0,92
FlexiSource	-1,98	9,94	10,92	5,53	2,29	0	1,03
	-2,38	9,95	5,62	1,16	-1,39	26,00	0,51
Gammamed	-5,19	9,97	12,08	6,89	0,94	0	1,16
12i	-5,29	9,98	13,53	9,03	2,05	33,41	1,32
Gammamed	-3,79	9,96	12,14	6,82	0,95	0	1,16
plus	-3,79	9,96	12,16	6,84	0,96	0,17	1,16
Microselect-	-1,97	9,92	13,12	7,39	0,20	0	1,24
ron V1	-1,97	9,92	13,03	7,35	0,20	-0,64	1,24
Microselect-	-2,28	9,85	13,22	6,29	0,16	0	1,19
ron V2	0,66	9,90	16,34	12,91	0,29	203	1,54
SPEC M19	-2,62	9,95	13,02	7,29	0,18	0	1,23
	-2,62	9,95	13,06	7,28	0,18	-0,10	1,23
VariSource	-7,10	9,98	11,12	5,39	3,07	0	1,02
Classic	-9,75	10,0	14,07	11,07	1,27	86,6	1,37
VariSource	1,34	9,87	13,11	6,44E-03	1,39	0	1,18
V2000	1,35	9,87	13,23	6,57E-03	1,46	1,29	1,19
Buchler	10,10	9,78	15,09	7,24	3,64	0	1,32
G0814	10,10	9,78	15,07	7,24	3,64	0	1,32
BEBIG	20,4	9,91	15,56	-0,48	0,00	0	0,16
Ir2.A95-2 [6]	19,3	9,98	13,22	10,51	0,90	260	1,48
BEBIG	32,5	9,72	11,31	1,93	2,45	0	1,10
Ir2.A95-2 [7]	36,7	9,61	14,85	2,54	6,08	-0,21	1,36

* Первая строка – формула (5), вторая – (7)

ков аппроксимация по формуле (7) дает наиболее удовлетворительные результаты. Параметры аппроксимации по формулам (5) и (7) представлены в табл. 3. Максимальные отклонения между данными аппроксимации и данными моделирования по методу Монте-Карло не превышают 0,6 %, тогда как средние отклонения составляют порядка 0,1 %. Предложенные функции подходят для использования в системах дозиметрического планирования с целью более точного вычисления дозовых распределений вокруг источников, в широком диапазоне данных согласно протоколу TG-43.

Заключение

В настоящей работе предложен метод аппроксимации радиальной дозовой функции закрытых источников для брахитерапии с высокой мощностью дозы на основе радионуклида ¹⁹²Ir. Предложенные функции использованы для аппроксимации данных 11 источников, полученных методом Монте-Карло авторами, а также доступных в базе данных Карлтонского уни-

верситета. Предложенные функции отличаются более высоким качеством аппроксимации по сравнению с полиномом пятого порядка, рекомендованным рабочей группой TG-43 AAPM. Данные функции могут быть использованы в диапазоне расстояний 0,5–20 см от источника. Максимальные отклонения между данными аппроксимации и данными моделирования по методу Монте-Карло не превышают 0,6 %, тогда как средние отклонения составляют порядка 0,1 %. Мы полагаем, что предложенные функции являются отличными кандидатами для использования при расчете дозных распределений в системах дозиметрического планирования.

Список литературы

1. Nath R., Anderson L.L., Luxton G. et al. Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 43. // Med. Phys., 1995, **22**, P. 209–234.

2. *Furhang E.E., Anderson L.L.* Functional fitting of interstitial brachytherapy dosimetry data recommended by the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 43. // *Med. Phys.*, 1999, **26**, P. 153–160.
3. *Moss D.* Technical note: Improved analytical fit to the TG 43 radial dose function. // *Med. Phys.*, 2000, **27**, P. 659–661.
4. *Meigooni A.S., Zhang H., Perry C. et al.* Theoretical and experimental determination of dosimetric characteristics for brachyseed Pd-103 model Pd-1 source. // *Appl. Radiat. Isot.*, 2003, **58**, P. 533–541.
5. *Taylor R.E.P., Rogers D.W.O.* More accurate fitting of ^{125}I and ^{103}Pd radial dose functions. // *Med. Phys.*, 2008, **35**, P. 4242–4250.
6. *Белусов А.В., Калачев А.А., Оципов А.С.* Вычисление дозиметрических характеристик источников для брахитерапии методом Монте-Карло. // *Вест. Моск. Универ. Серия 3. Физика. Астрономия.* 2014, № 6, С. 95–100.
7. *Granero D., Perez-Calatayud J., Ballester F.* Monte Carlo study of the dose rate distributions for the IR.A85-2 and IR.A85-1 Ir-192 afterloading sources. // *Med. Phys.*, 2008, **35**, P. 1280–1287.
8. http://www.physics.carleton.ca/clrp/seed_database/.

FITTING RADIAL DOSE FUNCTIONS OF ^{192}Ir BRACHYTHERAPY SOURCE

A.V. Belousov¹, A.S. Ocipov¹, A.A. Kalachev¹, A.P. Chernyaev^{1,2}

¹ *Faculty of Physics M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *SINP M.V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia*

The improved functional form for fitting radial dose function the closed sources for brachytherapy on a basis ^{192}Ir is proposed. The proposed functions allow precisely fitting radial dose function in a range 0.5–20 cm. The maximum deviations between fitting data and Monte Carlo modeling data do not exceed 0.6 % whereas average deviations make in order of 0.1 %. Parameters of fitting for the offered functions are resulted for 11 sources of various manufacturers. The proposed functions approach for use in therapy planning system for the purpose of more exact calculation dose distributions around sources, using a wide range of data according to AAPM report TG-43.

Key words: *brachytherapy, ^{192}Ir , radial dose functions, fitting functions*

E-mail: BelousovAV@physics.msu.ru