

УДК 539.1.08: 539.16.08

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОМЕТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ NaI(Tl) ДЕТЕКТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ  $^{131}\text{I}$  В ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЕ**<sup>1,2</sup>А.А. ЗАГОРОДНЮК<sup>1</sup>Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Белорусский государственный университет,

(Минск, Республика Беларусь)

**Аннотация.** В работе рассчитывается эффективность регистрации спектрометра излучения человека, предназначенного для определения содержания радионуклида  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе. Исследуется зависимость эффективности регистрации прибора от его расположения относительно щитовидной железы для различных половозрастных групп. Расчет эффективности регистрации происходит при помощи Монте-Карло моделирования в программе *Fluka* путем построения компьютерной модели прибора и моделей фантома человека.

**Ключевые слова:** Монте-Карло моделирование, компьютерная модель человека, спектрометрия излучения человека, *Fluka*.

**DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF A WHOLE BODY COUNTER BASED ON NaI(Tl) DETECTOR WHEN MEASURING THE  $^{131}\text{I}$  CONTENT IN THE THYROID GLAND**<sup>1,2</sup>A.A. ZAHARADNIUK<sup>1</sup>Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX», Belarus, Minsk<sup>2</sup>Belarusian state university,

(Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper assesses the efficiency of a whole body counter designed to determine the content of the  $^{131}\text{I}$  radionuclide in the thyroid gland. The dependence of the efficiency of the device is investigated with respect to its location relative to the thyroid gland for different age and gender groups. Efficiency calculation is carried out by using Monte Carlo simulation in the *Fluka* program by creating a computer model of the device and models of a human phantoms.

**Keywords:** Monte-Carlo modeling, computer model of human body, whole body counter, *Fluka*

**Введение**

Радионуклид  $^{131}\text{I}$  является бета- и гамма-радиоактивным изотопом йода с периодом полураспада примерно равным 8 суткам, выделяющимся в реакторе атомной электростанции при делении ядер урана в ядерном топливе [1]. Из-за специфики работы реакторной установки, выброс  $^{131}\text{I}$  в окружающую среду происходит даже при нормальной эксплуатации АЭС [2, 3]. Йод, являясь важным для организма микроэлементом, поглощается человеческим телом из внешней среды и накапливается в щитовидной железе [4]. Из-за невозможности химического разделения изотопов одного элемента, в щитовидной железе происходит накопление всех разновидностей йода, поглощенных из окружающей среды. Поэтому на АЭС и близлежащих территориях необходим постоянный мониторинг этого радионуклида, в том числе посредством измерения его накопления в щитовидной железе для различных половозрастных категорий.

Одним из приборов, позволяющих оценить количество  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе *in vitro* является спектрометр излучения человека (СИЧ). Измеряя спектр гамма-излучения  $^{131}\text{I}$ , данный прибор позволяет определить активность радионуклида в щитовидной железе.

Количество гамма-квантов, попадающих в детектор (и как следствие эффективность регистрации прибора) зависит как от расположения детектора относительно щитовидной железы, так и от ее размера. В данной работе исследуется зависимость эффективности регистрации гамма-излучения  $^{131}\text{I}$  СИЧ СКГ-АТ1322 [5] (производства УП «Атомтех») при различном положении блока детектирования относительно щитовидной железы для различных половозрастных групп.

### Методика определения эффективности

Определение эффективности регистрации СИЧ [6] выполнено при помощи компьютерного моделирования методом Monte-Carlo в программе *Fluka* [7]. В данной программе была создана модель блока детектирования СИЧ AT1322 (в основе блока детектирования лежит детектор на основе сцинтилирующего кристалла NaI(Tl) с размерами 63х63 мм, работающего в спектрометрическом режиме: количество каналов равно 1024, максимальная энергия 3.086 МэВ, цена деления канала 3.013 кэВ, рис. 1) и компьютерная модель фантома человека (рис. 2), расположенные друг относительно друга на заданном расстоянии. Под эффективностью регистрации прибора понимается следующая величина:

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot \eta}, \quad (1)$$

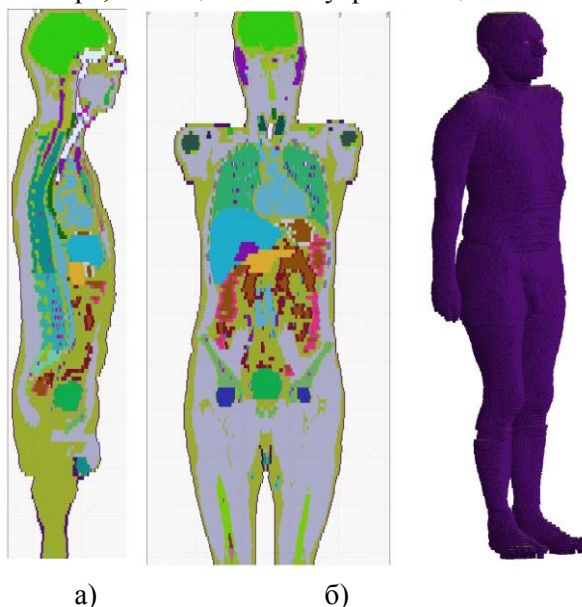
где  $N$  – скорость счета импульсов в пике полного поглощения;

$A$  – активность радионуклида в щитовидной железе;

$\eta$  – квантовый выход фотонов с заданной энергией.



**Рис. 1.** Компьютерная *Monte-Carlo* модель блока детектирования СИЧ AT1322, состоящая из детектора, помещенного внутрь свинцового коллиматора



**Рис. 2.** Компьютерная модель фантома взрослого человека мужского пола (М А): а – сечение плоскостью YZ; б – сечение плоскостью XY; в – трехмерная модель человека

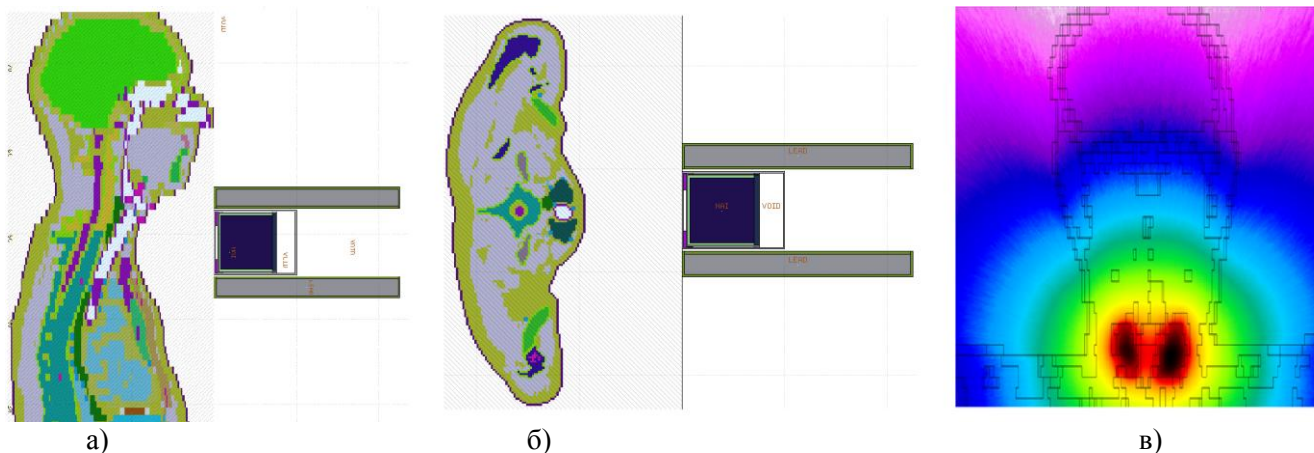
Рассмотрены следующие модели фантома человека: модель фантома человека мужского пола возрастом 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослый человек; модель фантома человека женского пола возрастом 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослый человек [8, 9]. Основные характеристики для каждого фантома приведены в таблице 1. Первая буква названия означает гендерную

принадлежность (M – male, F – female), следующие цифры означают возраст фантома ( 5y - 5 years, 10y - 10 years, 15y - 15 years, A - adult).

**Таблица 1.** Основные характеристики фантомов человека

Фантом	M 5y	F 5y	M 10y	F 10y	M 15y	F 15y	M A	F A
Рост, см	109	109	138	138	167	161	176	163
Масса, кг	19	19	32	32	56	53	73	60
Кол-во вокселей, миллион	55.1	55.1	54.5	54.5	53.6	54.0	7.1	14.2
Толщина вокселя, мм	0.85	0.85	0.99	0.99	1.25	1.2	2.137	1.775
Высота вокселя, мм	1.928	1.928	2.425	2.425	2.832	2.828	8.0	4.84
Объем щитовидной железы, см <sup>3</sup>	3.2	3.2	7.5	7.5	11.4	11.4	19.2	16.4
Масса щитовидной железы, г	3.4	3.4	7.9	7.9	12.0	12.0	20.0	17.0

Для каждого фантома в области расположения щитовидной железы создан равномерно распределенный изотропный источник фотонного излучения, со спектром аналогичным спектру радионуклида <sup>131</sup>I (рисунок 3, в). Коллиматор прибора, предназначенный для выделения телесного угла, в границах которого расположен источник излучения, центрируется относительно щитовидной железы фантома человека (рисунок 3, а, б) на пяти различных расстояниях: 1 см, 3 см, 5 см, 7 см, 10 см. Для каждого расположения коллиматора относительно фантома человека исследуется эффективность регистрации при нескольких различных положениях детектора относительно переднего края коллиматора: 0 см, 2 см, 4 см, 6 см, 8 см, 10 см. Программа рассчитывает энергетический спектр фотонного излучения, поглощенного в активном объеме детектора. Далее программа определяет количество импульсов в пике полного поглощения и находит его отношение к количеству испущенных источником частиц. Результаты расчета эффективности регистрации при различных положениях детектора относительно поверхности кожи фантома человека для различных половозрастных групп для радионуклида <sup>131</sup>I (квантовый выход фотонов с энергией 364.5 кэВ равен 81.5%) представлены в таблицах 2, 3.



**Рис.3.** Пример расположения модели блока детектирования относительно щитовидной железы: а – сечение XZ; б – сечение XY; в – источник излучения, распределенный в щитовидной железе

**Таблица 2.** Эффективность регистрации для фантомов мужского пола, имп/фотон  $\cdot 10^2$ 

DCD, см	SCD, 1 см	SCD, 3 см	SCD, 5 см	SCD, 7 см	SCD, 10 см
Мужской фантом человека в возрасте 5 лет					
0	4.573	2.652	1.698	1.173	1.113
2	2.564	1.702	1.191	0.864	0.817
4	1.625	1.175	0.871	0.663	0.625
6	1.129	0.866	0.665	0.526	0.492
8	0.826	0.663	0.528	0.426	0.400
10	0.631	0.524	0.428	0.355	0.333
Мужской фантом человека в возрасте 10 лет					
0	4.319	2.674	1.717	1.188	1.001
2	2.469	1.709	1.184	0.870	0.747
4	1.588	1.180	0.866	0.661	0.572
6	1.098	0.867	0.666	0.526	0.458
8	0.812	0.665	0.528	0.426	0.375
10	0.621	0.529	0.428	0.353	0.312
Мужской фантом человека в возрасте 15 лет					
0	3.757	2.626	1.623	1.121	0.643
2	2.204	1.675	1.125	0.825	0.507
4	1.434	1.153	0.823	0.632	0.410
6	1.001	0.842	0.632	0.502	0.339
8	0.744	0.647	0.499	0.406	0.282
10	0.580	0.513	0.407	0.340	0.242
Мужской фантом взрослого человека человека					
0	2.909	1.756	1.242	0.897	0.626
2	1.816	1.207	0.899	0.680	0.493
4	1.232	0.875	0.680	0.530	0.399
6	0.891	0.664	0.535	0.428	0.328
8	0.671	0.524	0.434	0.353	0.276
10	0.520	0.423	0.356	0.294	0.234

**Таблица 3.** Эффективность регистрации для фантомов женского пола, имп/фотон \*10<sup>2</sup>

DCD, см	SCD, 1 см	SCD, 3 см	SCD, 5 см	SCD, 7 см	SCD, 10 см
Женский фантом человека в возрасте 5 лет					
0	4.588	2.666	1.706	1.177	1.119
2	2.564	1.709	1.189	0.861	0.817
4	1.628	1.178	0.870	0.659	0.625
6	1.124	0.864	0.664	0.526	0.494
8	0.818	0.663	0.526	0.428	0.399
10	0.628	0.518	0.427	0.356	0.331
Женский фантом человека в возрасте 10 лет					
0	4.337	2.677	1.710	1.185	1.004
2	2.455	1.708	1.182	0.872	0.745
4	1.582	1.180	0.865	0.665	0.579
6	1.099	0.870	0.666	0.526	0.458
8	0.810	0.665	0.528	0.428	0.377
10	0.622	0.525	0.428	0.356	0.317
Женский фантом человека в возрасте 15 лет					
0	4.217	2.395	1.578	1.119	0.720
2	2.429	1.558	1.103	0.821	0.558
4	1.562	1.096	0.815	0.629	0.444
6	1.087	0.813	0.633	0.502	0.363
8	0.805	0.628	0.503	0.409	0.307
10	0.616	0.498	0.411	0.340	0.261
Женский фантом взрослого человека					
0	3.795	2.166	1.437	1.026	0.659
2	2.209	1.422	1.017	0.762	0.509
4	1.433	1.006	0.755	0.588	0.410
6	1.001	0.745	0.584	0.466	0.337
8	0.741	0.578	0.469	0.384	0.283
10	0.574	0.460	0.380	0.319	0.242

DCD (Detector Collimator Distance) – расстояние от края коллиматора до передней поверхности детектора;

SCD (Skin Collimator Distance) – расстояние от края коллиматора до поверхности кожи фантома человека.

### Обсуждение результатов моделирования

Результаты моделирования показывают, что наибольшую эффективность регистрации СИЧ имеет при минимальном расстоянии между передней поверхностью детектора и поверхностью кожи (эффективность регистрации достигает 0.046 имп/фотон при измерении спектра гамма-излучения  $^{131}\text{I}$  от щитовидной железы фантома ребенка). Минимальную эффективность регистрации система имеет при измерении гамма-излучения  $^{131}\text{I}$  от щитовидной железы фантома взрослого человека при максимальном расстоянии между поверхностью детектора и поверхностью кожи (для радионуклида  $^{131}\text{I}$  эффективность регистрации в этом случае 0.0024 имп/фотон). Это объясняется различным средним телесным углом [10], под которым виден источник детектору: чем ближе детектор к источнику, тем больше частиц попадает в него. Однако данный результат верен только при условии локализации радионуклида в области щитовидной железы, а также полного отсутствия фонового излучения. Если радионуклид помимо щитовидной железы распределен и в других органах, либо в непосредственной близости от детектора (например, на одежде), то результат моделирования, ввиду сложности разделения излучения от различных источников, может не отражать реальную эффективность прибора. Более детальная оценка абсолютной эффективности прибора для каждого конкретного случая требует уточнения условий измерения. Результаты моделирования, представленные в настоящей работе, можно считать пороговым случаем идеального измерения при отсутствии фонового излучения и дополнительных источников ионизирующего излучения, распределенных вне щитовидной железы (верхняя граница эффективности регистрации).

Исходя из результатов моделирования можно сделать вывод, что эффективность регистрации СИЧ при измерении  $^{131}\text{I}$  слабо зависит от возраста измеряемого человека. Максимальная разница между значениями эффективности регистрации наблюдается при сравнении результатов измерения фантома ребенка в возрасте 5 лет и фантома взрослого человека при условии, что все остальные параметры измерения одинаковые (одинаковое расстояние от поверхности кожи до коллиматора, одинаковое расстояние от торца коллиматора до передней поверхности детектора, одинаковая активность радионуклида). Максимальное отклонение в этом случае не превышает 42% (для случая SCD = 10см, DCD = 0 см, фантом ребенка, фантом взрослого), причем в большинстве случаев чем меньше абсолютный размер щитовидной железы (чем меньше возраст измеряемого человека) тем выше эффективность. Это можно объяснить тем, что при одинаковой активности источника и примерно одинаковом его расположении, более компактное размещение (распределенный источник становится больше похож на точечный) увеличивает средний телесный угол, под которым он виден детектору [10, 11].

### Список литературы:

1. Кочнов, Ю. Оценка увеличения производства  $^{131}\text{I}$  при использовании теллурических мишеней усовершенствованной конструкции на реакторе ВВР-ц / О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, Р.В. Фомин, Г.М. Жердев // Физика и техника ядерных реакторов. - 2014. - №4. - с. 102-110.
2. Полянцев, С. Актуальные вопросы контроля газоаerosольных выбросов на АЭС / С.С. Полянцев, И.В. Пырков, Е.И. Григорьев // АНРИ. - 2009. - № 2. - с. 37-46.
3. Верещако, Г.Г. Радиобиология: термины и понятия: энцикл. Справ. / Г.Г. Верещако, А.М. Ходосовская. - Нац. Акад. Наук Беларуси. : Минск: Беларуская навука, 2016. – 340 с.
4. Preedy, V. Comprehensive Handbook of Iodine / V. Preedy, G. Burrow, R. Watson. - New York; Oxford: Oxford Univ. Press, 2009. – 1334 p.
5. Спектрометры излучения человека СКГ-АТ1322, СКГ-АТ1322/1. URL: <https://atomtex.com/ru/spektrometry-izlucheniya-cheloveka-skg-at1322-skg-at13221> (accessed March 17, 2021).
5. Reily, D/ Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials / D. Reily, N. Enssin, H. Smith. – Los Alamos; US: Los Alamos, 1991. – 723 p.

6. Fluka-4 Manual. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/fluka.html> (accessed January 20, 2021).
7. ICRP 110 Adult Reference Computational Phantoms, 2009
8. ICRP 143 The Reference Computational Phantom Family, 2020
9. Welopolski, W. The Monte Carlo Calculation of the Average Solid Angle Subtended by a Right Circular Cylinder From Distributed Sources/ W. Welopolski // Nuclear Instruments and Methods. – 1977. - vol.143. – p. 577-581
10. Abbas, M. Analytical Calculations of the Solid Angles Subtended by a Well-Type Detector at Point and Extended Circular Sources / M. Abbas // Applied Radiation and Isotopes. – 2006. - vol.4. – p.1048-1056