

Т. Меджадж¹, А.И. Ксенофонтов¹, А.В. Далечина²

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ LEKSELL GAMMA KNIFE PERFEXION МЕТОДОМ ПОВОРОТА В ФАЙЛЕ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА

1. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва;
2. Деловой центр нейрохирургии, Центр Гамма-Нож, Москва
Контактное лицо: Toufik Medjadj toufik.medjadj@yahoo.fr

РЕФЕРАТ

Цель: Разработка эффективного способа моделирования методом Монте-Карло системы Гамма-Нож модели Perfexion на основе поворота частиц в файле фазового пространства PSF (phase space file). Этот способ не нуждается в моделировании всех 192 источников излучения установки, распределенных в коллиматоре конической формы. Моделирование выполняется только для 5 источников из 192 источников для каждого коллиматора установки.

Материал и методы: В предыдущей модели системы Гамма-Нож применялся файл фазового пространства только для одного источника при моделировании дозового распределения методом Монте-Карло, так как такое фазовое пространство одинаково для всех 201 источника прежней модели. Модель Perfexion является более сложной как из-за не-коаксиального расположения источников, так из-за сложности самой системы коллиматора.

В данной работе предложен эффективный способ моделирования излучения для модели Perfexion с помощью файла фазового пространства с использованием программного пакета Penelope. При этом файл фазового пространства был создан для одного источника в каждом кольце, т.е. всего 5 файлов для каждого размера коллиматора. Файлы фазового пространства для других источников были получены с помощью поворота вокруг оси Z азимутальным перераспределением частиц, после чего полученные файлы фазового пространства одного кольца сохранялись вместе в одном файле.

Результаты: Достоверность полученных результатов проверялась сравнением дозовых профилей и выходных факторов с результатами расчетов по алгоритму TMR10 планирующей системы Leksell Gamma Plan в гомогенной среде. Критерий приемлемости между расчетами по TMR10 и методом Монте-Карло основан на гамма-индексе (GI), значение которого больше единицы не обнаружено для всех случаев, что свидетельствует о хорошем согласии результатов. Различия между факторами выхода, полученными в данной работе, и данными TMR10 для коллиматоров диаметров 8 и 4 мм составляют 0,74 и 0,73 % соответственно.

Заключение: В работе успешно разработан и предложен эффективный способ моделирования системы Гамма-Нож модели Perfexion. Данный способ обеспечивает корректные расчеты дозовых распределений в гомогенной среде для коллиматоров с диаметром 16, 8 и 4 мм.

Ключевые слова: установка Гамма-Нож Perfexion, Монте-Карло-моделирование, файл фазового пространства

Для цитирования: Меджадж Т., Ксенофонтов А.И., Далечина А.В. Эффективный способ моделирования системы Leksell Gamma Knife Perfexion методом поворота в файле фазового пространства. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(1):54-8.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-1-54-58

Введение

Leksell GammaKnife (LGK) – это радиохирургическая установка, которая используется для лечения внутричерепной патологии. В этой системе используется энергия гамма-излучения радиоактивных источников кобальта-60, сфокусированного в одной точке (изоцентре) и создающего большое значение мощности дозы. Для обеспечения жесткой фиксации головы пациента используется стереотаксическая рама.

Моделирование методом Монте-Карло (ММК) является наиболее подходящим и надежным способом проверки дозиметрических характеристик установки LGK. Предыдущие модели U, B, C и 4C имели 201 пучок, направленный в одну точку, расположенную на расстоянии 40,3 см от мишени [1, 2], а файл фазового пространства PSF (Phase Space File) применялся только для одного источника при моделировании дозового распределения, при этом фазовое пространство было одинаково для всех 201 источников [3].

Модель Perfexion имеет иную систему коллимации по сравнению с предыдущими моделями [2]. В данной системе источников 192 пучка ⁶⁰Co располагаются в 5 кольцах, радиационная полость имеет коническую

форму. Каждое кольцо имеет различное расстояние источник–изоцентр (от 374 до 433 мм) [4, 5]. Кольца соединены в 8 секторов, в каждом из которых находится по 24 источника (рис. 1). ММК для этой модели является нетривиальной задачей из-за не-коаксиального

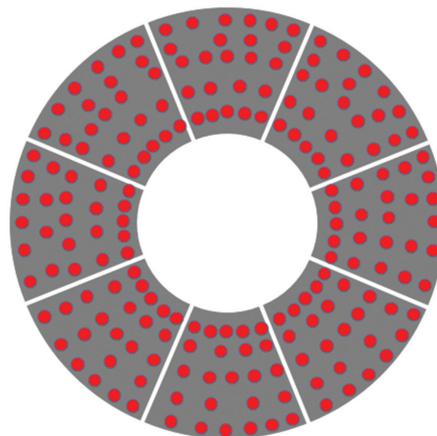


Рис. 1. Положение 192 источников в коллиматоре LGK. Эта модель состоит из 8 секторов, в каждом секторе 24 источника распределены в 5 кольцах

Fig. 1. Position 192 source JD in the LGK Perfexion collimator. This model consists of 8 sectors, in each sector 24 sources are distributed in 5 rings

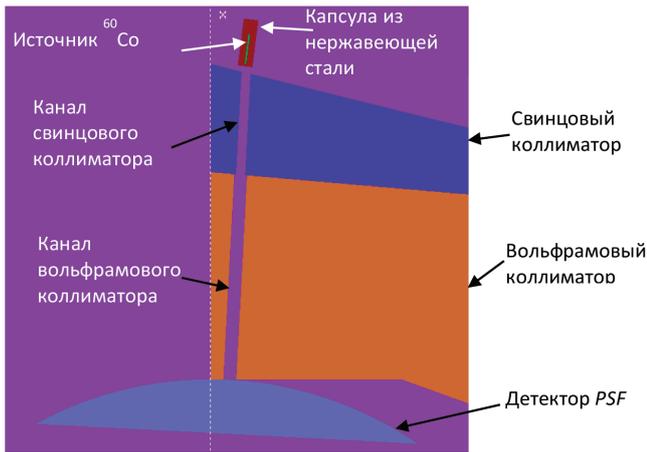


Рис. 2. Геометрия коллиматора с детектором PSF
Fig. 2. The geometry of the collimator with the detector PSF

расположения источников и сложности самой системы коллимации.

Материал и методы

Моделирование

Для выполнения моделирования использовался программный пакет Penelope [6]. Первый этап моделирования заключался в сохранении характеристик частиц (тип частицы, энергия, расположение и направление движения) в файле фазового пространства PSF для одного источника в каждом кольце (рис. 2). Таким образом были получены 5 файлов фазового пространства для каждого размера апертуры коллиматора (16, 8 и 4 мм). Файлы фазового пространства для других источников получались с помощью поворота вокруг оси Z азимутальным перераспределением частиц в файле фазового пространства PSF [7, 8]. Затем файлы PSF одного кольца сохранялись вместе в одном файле программы.

На втором этапе осуществлялась генерация частиц из файла фазового пространства для последующего расчета дозовых распределений в мишени.

Азимутальное перераспределение

Для повышения эффективности расчетов с учетом наличия симметричных колец коллимационной

системы был разработан метод азимутального перераспределения частиц, основанный на использовании широтных и азимутальных углов источников [9].

Программа Penelope обладает способностью записывать характеристики частиц в файле фазового пространства (PSF), что позволяет останавливать и перезапускать процесс моделирования, анализировать характеристики частиц и их модификации и др. Характеристики, зарегистрированные в PSF, включают тип частиц, энергию, координаты (x, y, z), направляющие косинусы (U, V, W) и т.д. Направление движения частицы описывается единичным вектором \vec{d} , определяемый направляющими косинусов:

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{pmatrix}. \tag{1}$$

Единичный вектор может быть записан через полярный угол θ и азимутальный угол φ [6]:

$$d(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Направляющие косинусы вектора (U, V, W) – это косинусы углов (α, β, γ), которые определяют вектор с положительными полуосями координат (рис. 3).

Азимутальный угол (φ) – угол между положительной полуосью X и проекцией вектора на плоскость XY (рис. 4).

Полярный угол (θ) – угол между положительной осью Z и вектором (рис. 4).

Для того, чтобы повернуть частицы в PSF азимутальным углом на плоскость XY, азимутальный угол (φ) вычисляется из выражений (1) и (2):

$$\frac{V}{U} = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \tan \varphi \Rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{V}{U} \right). \tag{3}$$

С целью учета знака двух компонентов вектора и размещения траектории в правильное направление функция арктангенс $\varphi = \text{atan2}(V, U)$ двух переменных используется в программе, написанной в системе Matlab.

Характеристики частиц, записанные в файле PSF, затем пересчитываются при повороте вокруг центральной оси Z с учетом цилиндрической симметрии колец коллимационной системы, после чего генерируется новый азимутальный угол φ' , а новые направляющие

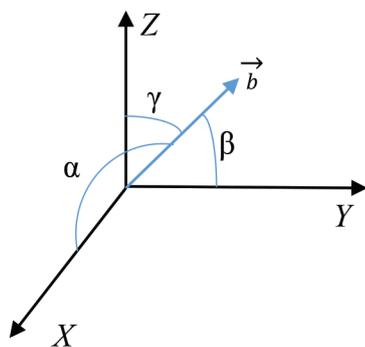


Рис. 3. Направляющие косинусы
Fig. 3. The guides of the cosines

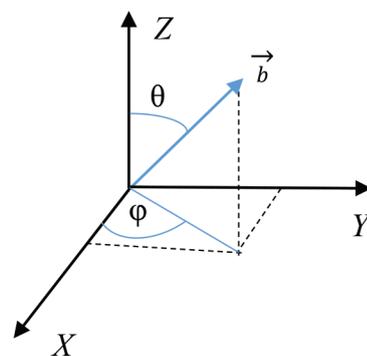


Рис. 4. Полярный (θ) и азимутальный (φ) углы
Fig. 4. Polar (θ) and azimuthal (φ) angles

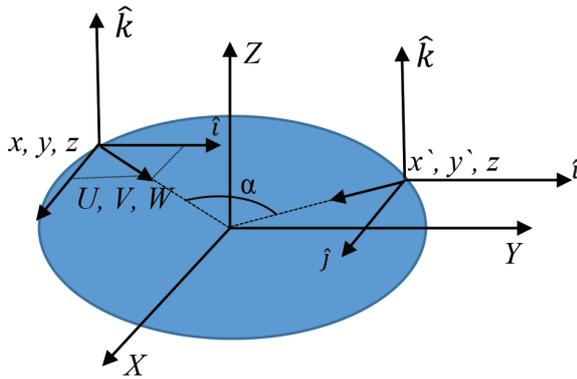


Рис. 5. Поворот частицы
Fig. 5. The rotation of the particles

щие косинусов частиц U' и V' преобразуются для того, чтобы сохранить исходное направление относительно центральной оси Z :

$$\begin{aligned} U' &= \sin' \cos \varphi' \\ V' &= \sin' \sin \varphi', \end{aligned} \tag{4}$$

где: $\varphi' = \varphi + \alpha$; α – азимутальный угол вращения.

Новое положение частицы (x', y') рассчитывается с помощью матрицы вращения (рис. 5):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Симуляция коллимационной системы с 192 источниками является трудной задачей из-за сложной геометрии коллиматора и нестандартного распределения источников в этой системе. Поэтому поворот частиц, записанных в PSF, представляет эффективную альтернативу.

Использование только одного источника в каждом кольце с получением его файла фазового пространства даёт возможность получить файлы фазового пространства для других источников с помощью поворота частиц вокруг оси Z с азимутальным перераспределением. Для вычисления поворота всех частиц в файле PSF была использована программа, написанная в системе Matlab. На выходе были получены 5 файлов PSF для каждого размера коллиматора. Все файлы фазового пространства одного и того же кольца сохранялись вместе в одном общем файле (табл. 1).

Каждая частица в файлах фазового пространства была генерирована два раза при расчете распределения дозы.

Таблица 1
Объем файлов для колец каждого коллиматора, Гб
The size of the files for the rings of each collimator, GB

Кольца	Коллиматоры, мм		
	16	8	4
1 (48 источников)	12,3	3,05	0,891
2 (32 источника)	8,18	2,22	0,646
3 (40 источников)	10,8	2,81	0,805
4 (32 источника)	8,81	1,85	0,585
5 (40 источников)	9,75	2,06	0,646

Критерий приемлемости между расчетами по TMR10 и Penelope основан на гамма-индексе GI (Gamma Index) [10]. Этот индекс учитывает относительный сдвиг как по значениям дозы так и по положению, объединяя вместе методы по разности доз DD (Dose Difference) и по расстоянию до согласия DTA (Distance To Agreement).

$$\gamma(m) = \min \{ \Gamma(r_m, r_c) \} \forall \{ r_c \}, \tag{6}$$

где:

$$\Gamma(r_m, r_c) = \sqrt{\frac{r^2(r_m, r_c)}{\Delta d_M^2} + \frac{\delta^2(r_m, r_c)}{\Delta D_M^2}};$$

$$r(r_m, r_c) = |r_c - r_m|;$$

$$\delta(r_m, r_c) = D_c(r_c) - D_m(r_m);$$

$D_m(r_m)$ – референсная доза D_m на справочном расстоянии r_m ;

$D_c(r_c)$ – рассчитанная доза D_c на расстоянии r_c ;

d_M – расстояние до согласия DTA ;

ΔD_M – разность доз DD .

Результаты и обсуждение

Дозиметрические расчеты были выполнены вдоль осей X и Z на дозовой матрице, состоящей из кубических вокселей размером 1 мм^3 для коллиматоров диаметром 16 и 8 мм и $0,5 \text{ мм}^3$ для коллиматора 4 мм.

Достоверность модели определяли путем сравнения дозовых профилей и выходных факторов данной работы с результатами расчетов по алгоритму TMR10 планирующей системы Leksell Gamma Plan в гомогенной среде методом гамма-индекса по следующим критериям приемлемости: расстояние до согласия DTA 1 мм и разность доз DD 3 %.

Дозовые профили

Дозовые профили в настоящей работе и полученные с помощью алгоритма TMR10, показаны на рис. 6 для коллиматоров каждого размера вдоль осей X и Z . Показано, что вдоль этих осей результаты практически совпадают. Над каждым профилем представлены результаты сравнения гамма-индекса. Как видно, во всех случаях значение гамма-индекса больше единицы не обнаружено, что свидетельствует о хорошем совпадении результатов.

Выходные факторы

В табл. 2 представлены результаты расчетов ММК в сравнении с данными TMR10, полученными без расчетов неопределенностей. Результаты по программе

Таблица 2
Выходные факторы для коллиматоров 8 и 4 мм
Output factors for collimators 8 and 4 mm

Размер коллиматора, мм	Выходные факторы			$\Delta, \%$
	TMR10	Penelope	Неопределенности расчетов ММК (3σ)	
8	0,900	0,907	$\pm 0,013$	0,74
4	0,814	0,820	$\pm 0,011$	0,73

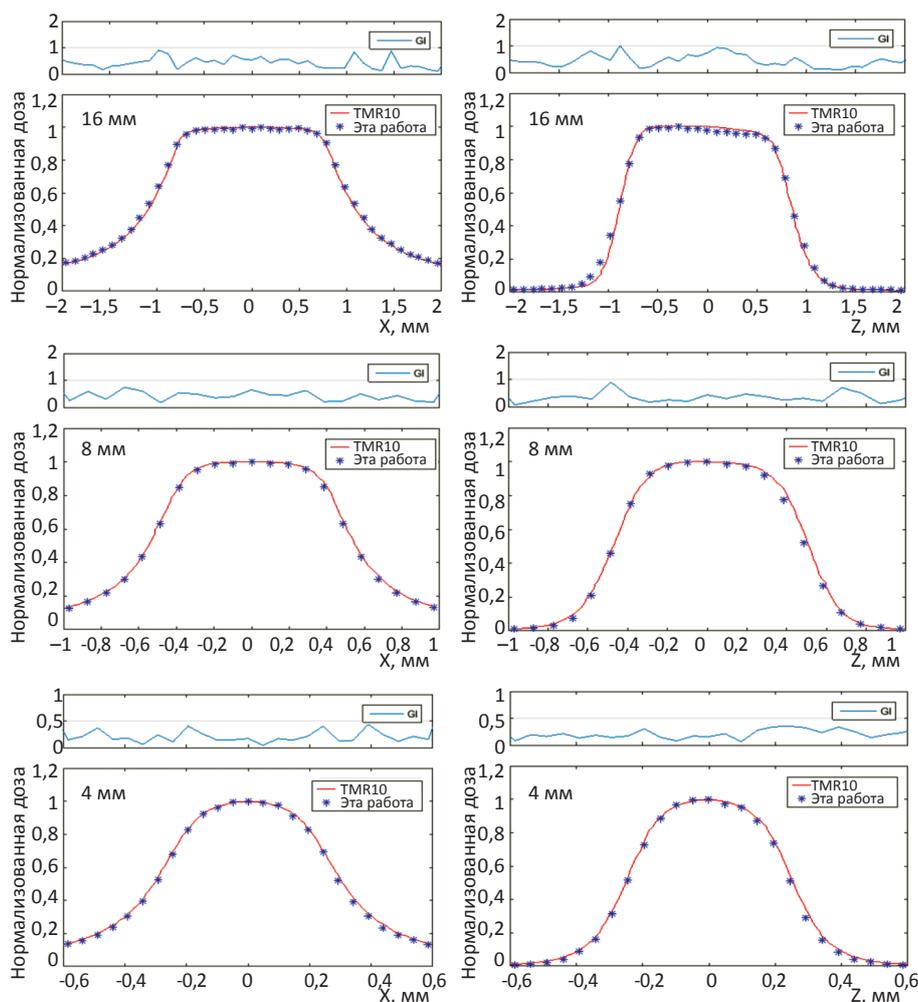


Рис. 6. Сравнение дозовых профилей вдоль осей X и Z для коллиматоров с апертурой 16, 8 и 4 мм методом гамма-индекса и графическое сравнение
 Fig. 6. Comparison of dose profiles along the x and Z axes for 16, 8 and 4 mm collimators using the gamma index method and graphical comparison

Penelope получены при величине неопределенностей 3σ (статистическая неопределенность, определяемая в процессе расчета методом Монте-Карло).

Различие ($\Delta\%$) между выходными факторами настоящей работы и полученными методом TMR10 вычислялось следующим образом:

$$\Delta\% = \left(\frac{B\Phi_{Penelope}}{B\Phi_{TMR10}} - 1 \right) \times 100. \tag{7}$$

Эти значения для каждого размера коллиматора, по рекомендациям Elekta, не должны превышать 2,5%. Их значения полученные в настоящей работе, равны 0,74% и 0,73% для коллиматоров 8 и 4 мм соответственно. В табл. 2 представлены выходные факторы, вычисленные для коллиматоров 8 и 4 мм при референсной дозе для коллиматора 16 мм.

Заключение

Разработан эффективный способ моделирования методом Монте-Карло системы LGK Perfexion с использованием перемещения и азимутального перераспределения частиц в файле фазового пространства PSF (*Phase Space File*). Представленный способ не требует моделирования для всех 192 источников, распределенных в коллиматоре конической формы данной модели. Моделирование выполняется только для 5 источников каждого размера коллиматора с получением их PSF файла.

Файлы фазового пространства для других источников были получены способом азимутального перераспределения частиц в файле фазового пространства с помощью поворота вокруг оси Z, что обеспечивает корректные расчеты дозовых распределений в гомогенной среде для коллиматоров 16, 8 и 4 мм.

An Effective Method of Simulation for the Leksell Gamma Knife Perfexion by Rotating Particles in the Phase Space File

T. Medjadj¹, A.I. Ksenofontov¹, A.V. Dalechina²

1. National Research Nuclear University (Moscow EnGineering Physics Institute) MEPhI, Moscow, Russia;
2. OJSC Neurosurgery Business Center, Moscow GammaKnife Center, Moscow, Russia
E-mail: toufik.medjadj@yahoo.fr

ABSTRACT

Purpose: To develop an effective method of Monte Carlo simulation of the GammaKnife Perfexion system by rotating particles in the phase space file (PSF). This method does not require simulating of all 192 sources that are distributed in the conical form of the Perfexion collimator. The simulation was performed only for 5 out of 192 sources for each collimator size.

Material and methods: Monte Carlo simulation of dose distribution for previous models of GammaKnife system requires phase space file for only one source, since this phase space is identical for all the 201 sources. The Perfexion model is more complex due to the non-coaxial positions of the sources and the complexity of the collimator system itself.

In this work, we present an effective method to simulate the Perfexion model using a phase space file. Penelope Monte Carlo code was used to perform this simulation. In this method, the PSF was obtained for one source in each ring, resulting in five files for each collimator size. PSF for other sources were created by azimuthal redistribution of particles, in the obtained PSF, by rotation around the Z-axis. The phase space files of the same ring were then stored together in a single file.

Results: The paper presented MC simulation using the azimuthal redistribution of particles in the phase space file by rotation around the Z-axis. The simulation has been validated comparing the dose profiles and output factors with the data of the algorithm TMR10 planning system Leksell Gamma Plan (LGP) in a homogeneous environment. The acceptance criterion between TMR10 and Monte Carlo calculations for the profiles was based on the gamma index (GI). Index values more than one were not detected in all cases, which indicates a good agreement of results. The differences between the output factors obtained in this work and the TMR10 data for collimators 8 mm and 4 mm are 0.74 and 0.73 %, respectively.

Conclusion: In this work successfully implemented an effective method of simulating the Leksell Gamma knife Perfexion system. The presented method does not require modeling for all 192 sources distributed in the conical form of the Perfexion collimator. The simulation was performed for only five sources for each collimator and their files PSF were obtained. These files were used to create the PSF files for other sources by azimuthal redistribution of particles, in these files, by rotation around the Z-axis providing correct calculations of dose distributions in a homogeneous medium for 16, 8 and 4 mm collimators.

Key words: Gamma-Knife Perfexion, Monte Carlo simulation, file phase field

For citation: Medjadj T, Ksenofontov AI, Dalechina AV. An Effective Method of Simulation for the Leksell Gamma Knife Perfexion by Rotating Particles in the Phase Space File. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(1):54-8. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-1-54-58

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Maitz A, Flickinger J, Lunsford L. Gamma Knife Technology and Physics: Past, Present, and Future. Lunsford LD, Kondziolka D, Flickinger JC (eds): Gamma Knife Brain Surgery. Prog Neurol Surg. Basel, Karger. 1998;14:5-20.
- Голанова АВ, Костюченко ВВ. Нейрорадиохирургия на Гамма-Нож. В сб.: История стереотаксиса и радиохирургии. ред. Костюченко ВВ. – Москва, 2018;121-31. [Golanov AV, Kostjuchenko BB. Neurosurgery with Gamma Knife. In: History of Stereotaxy and Radiosurgery. Kostjuchenko BB, ed. Moscow. 2018:121-31. (In Russ.).]
- Yuan J, Lo SS, Zheng Y, Sohn JW, Sloan AE, Ellis R, et al. Development of A Monte Carlo Model for Treatment Planning Dose Verification of the Leksell Gamma Knife Perfexion Radiosurgery System. J Applied Clinical Medical Physics. 2016;17(4):190–201.
- Lindquist C, Paddick I. The Leksell Gamma Knife Perfexion and Comparisons with Its Predecessors. Neurosurgery. 2007;61:130-40.
- Ma L, Kjäll P, Novotny J, Nordström H, Johansson J, Verhey L. A Simple and Effective Method for Validation and Measurement of Collimator Output Factors for Leksell Gamma Knife Perfexion. Phys Med Biol. 2009;54:3897-907.
- Salvat F, Jose M, Josep S. PENELOPE-2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, OECD-NEA, Report 6416, Issy-les-Moulineaux, France. 2009.
- Bush K, Zavgorodni SF, Beckham WA. Azimuthal Particle Redistribution for the Reduction of Latent Phase-Space Variance in Monte Carlo Simulations. Phys Med. Biol. 2007;52:4345-60.
- Brualla L, Sauerwein W. On the Efficiency of Azimuthal and Rotational Splitting for Monte Carlo Simulation of Clinical Linear Accelerators. Radiation Phys and Chemistry. 2010;79:929-32.
- Cho YB, van Prooijen M, Jaffray DA, Islam MK. Verification of Source and Collimator Configuration for Gamma Knife Perfexion Using Panoramic Imaging. Med Phys. 2010;37(3):1325-31.
- Low DA, Harms WB, Mutic S, Purdy JA. A Technique for the Quantitative Evaluation of Dose Distributions. Med Phys. 1998;25:656-61.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 08.04.2019. **Принята к публикации:** 11.12.2019.

Article received: 08.04.2019. **Accepted for publication:** 11.12.2019.