



ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

УДК 539.122.04

ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ С ВЫСОКИМ ЗНАЧЕНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ НА ФАКТОР КАЧЕСТВА ФОТОНОВ

А. В. Белоусов, Г. А. Крусанов, А. А. Калачев, А. П. Черняев

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

E-mail: belousovav@physics.msu.ru



В работе исследована энергетическая зависимость фактора качества моноэнергетического фотонного излучения с энергией до 40 МэВ при прохождении через тонкий слой. Условия облучения моделируют радиобиологические эксперименты по определению относительной биологической эффективности. Фактор качества вычисляется на основе данных о линейных потерях энергии всех частиц в облучаемом слое, которые рассчитываются методом Монте-Карло с использованием программного кода, разработанного в пакете Geant4. Показано, что в рассматриваемых слоях в результате образования тяжелых частиц с высоким значением линейной передачи энергии фактор качества фотонов существенно (в 3–15 раз в зависимости от толщины слоя) отличается от рекомендованного значения, равного 1.

Ключевые слова: фотонное излучение, фактор качества, линейная передача энергии, фотоядерные реакции, Geant4.

Effect of Secondary Particles with High Linear Energy Transfer on Photon Beam Quality Factor

A. V. Belousov, G. A. Krusanov,
A. A. Kalachev, A. P. Chernyaev

The energy dependence is investigated for a monoenergetic photon radiation quality factor with energies up to 40 MeV, while passing through a thin layer. The conditions of irradiation simulate radiobiological experiments to determine the relative biological effectiveness. The quality factor is calculated on the basis of data on linear energy transfer of all the particles in the irradiated layer, which are calculated using the Monte-Carlo method using GEANT4 code. It has been shown that in considered layers as a result of heavy particles with a high linear energy transfer photon quality factor significantly (3–15 times depending on the layer thickness) differs from the recommended value of 1.

Key words: photon radiation, quality factor, linear energy transfer, photonuclear reactions, Geant4.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-2-103-108

Введение

Проблема биологической эффективности ионизирующих излучений с различными значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ) продолжает оставаться одной из центральных

проблем радиобиологии. От ее решения зависят многочисленные вопросы, связанные с различными областями науки, промышленности, медицины и некоторых других областей. До последнего времени концепция относительной биологической эффективности (ОБЭ) использовалась как в радиобиологических экспериментах, так и в практике радиационной защиты. Зависимость величины коэффициента ОБЭ и связанных с этой величиной коэффициентов от ЛПЭ регламентируется различными международными комиссиями, главным образом МКРЗ (Международная комиссия по радиационной защите) и МКРЕ (Международная комиссия по радиационным единицам). В настоящее время концепцию ОБЭ принято использовать только в радиобиологии при сравнительных исследованиях действия различных типов излучения, в том числе для излучений одного вида, но с разными энергиями. В практике радиационной защиты предложены различные уточняющие коэффициенты ОБЭ, при этом полагают, что независимо от типа излучения биологический эффект будет одинаков, если одинакова эквивалентная доза, т.е. произведение поглощенной дозы на уточняющий коэффициент. В частности, одним из таких коэффициентов является фактор качества, который связан с ЛПЭ функциональной зависимостью. Согласно рекомендациям международных комиссий фотонное излучение считается излучением с низким значением ЛПЭ, и его ОБЭ принимается равным единице независимо от его энергии. Однако в процессе прохождения высокоэнергетичного излучения через биологические ткани образуются потоки ионизирующих излучений, ЛПЭ которых лежит в широких пределах. Обычно считается, что вклад продуктов фотоядерных реакций в погло-



ценную дозу незначителен, однако вследствие высоких значений ЛПЭ вклад в эквивалентную дозу может быть весьма весом. Особенно ярко, как показано в предыдущих работах [1], этот эффект проявляется при прохождении фотонов через тонкие слои облучаемого вещества, что соответствует практике радиобиологических экспериментов.

До настоящего времени к проблеме оценки биологической эффективности с помощью методов компьютерного моделирования получали развитие два подхода. В первом подходе оценивались только энергетические спектры фотонного излучения (для этого использовались хорошо известные программные коды линейек MCNP [2], EGS [3] и некоторые другие [4–7], разрабатываемые под каждый конкретный проект), вклад продуктов в поглощенную дозу оценивался «вручную» с помощью табличных значений сечений фотоядерных реакций и таблиц линейных коэффициентов ослабления и поглощения фотонного излучения. Данный подход позволяет определить средние значения ЛПЭ всех образовавшихся частиц, если известны сечения соответствующих реакций, однако весьма трудоемок и его погрешность велика. В случае аналитических расчетов велики погрешности, вносимые как аналитическими методами расчета, так и приближениями, согласно которым в любой точке облучаемой ткани наблюдается равновесие заряженных частиц.

Второй подход основан на вычислении усредненных микродозиметрических характеристик, таких как линейная и удельная энергия. Данный подход имеет то преимущество, что позволяет экспериментально проверить полученные величины, а его недостатком является расчет конечных величин по усредненным значениям. В результате определяются микродозиметрические характеристики в некоторой точке пространства, определяется функциональная зависимость от поглощенной дозы и производится свертка с так называемой биологической функцией, полученной в радиобиологических экспериментах. Однако к настоящему времени данный подход реализован только в расчетах с помощью программного кода на основе EGS [8], который позволяет учитывать только такие частицы, как фотоны, электроны и позитроны, и не позволяет учитывать вклад продуктов фотоядерных реакций. Основные направления исследования биологической эффективности различных видов ионизирующих излучений со-

гласно логике второго подхода сосредоточены в области моделирования полной клеточной структуры. Здесь существует некая разновидность, а именно разработан программный комплекс на основе кода GEANT4 (проект GEANT4-DNA [9–10]), который является готовым продуктом, не требующим от пользователя освоения пакета GEANT4. Однако в данном продукте (GEANT4-DNA) возможно моделирование процесса транспорта частиц только в водной среде и только некоторых частиц: фотонов, электронов протонов и альфа-частиц, причем в качестве вторичных частиц могут образовываться только фотоны, электроны и позитроны. Кроме того, невозможно симулировать процесс облучения масштабных фантомов, моделирующих биологическую ткань, а только отдельные клетки.

Целью настоящего исследования является определение линейной передачи энергии всех типов частиц, индуцированных фотонным излучением в биологических тканях, и расчет связанных с этой величиной характеристик: эквивалентной дозы и, в конечном итоге, фактора качества фотонного излучения различных энергий при облучении слоев различной толщины.

1. Материалы и методы

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) моделирование транспорта монохроматического фотонного излучения через изучаемый объект с заданной геометрией и элементным составом;
- 2) трассировка всех видов вторичных частиц, образовавшихся в слое, и определение значений их ЛПЭ;
- 3) определение поглощенной энергии, создаваемой в тонком слое каждой частицей, и расчет суммарной поглощенной слоем дозы;
- 4) определение биологической эффективности каждой частицы с определенным значением ЛПЭ и расчет суммарной эквивалентной дозы в слое;
- 5) расчет среднего значения фактора качества фотонного излучения.

Задача решается методом компьютерного моделирования с помощью программного кода GEANT4 [11–12], используемого для задач прохождения ионизирующего излучения через вещество методом Монте–Карло. GEANT4 представляет собой набор инструментов и библиотек языка программирования C++, не являясь готовым продуктом. Пользователю необходимо



самому написать программу, для чего требуется создать геометрию детектора, параметры пучка, физическую модель процессов и организовать возможность накопления и вывода данных. Для этих целей существуют как готовые классы, так и предоставлена возможность их модифицирования и создания новых. Благодаря гибкости кода GEANT4 применяется для решения широкого круга задач в ядерной, ускорительной физике, в том числе и в медицине.

В настоящей работе расчеты основываются на применении физической модели QGSP_BIC, которая в дополнение к стандартным электромагнитным взаимодействиям описывает также адронные, т.е. взаимодействие протонов, нейтронов, пи- и К-мезонов, а также тяжелых ядер, с учетом вторичных частиц. Среди прочих эта модель оптимальным образом подходит для медицинских задач при энергиях пучка до 200 МэВ и рекомендована к применению.

Геометрия задачи моделирует реальные радиобиологические эксперименты и реализована следующим образом. Облучаемый слой воды переменной толщины, расположенный на подложке из полиметилметакрилата, облучается широким пучком фотонов для обеспечения поперечного электронного равновесия. Исследуемый слой определяется как чувствительный детектор (Sensitive Detector) и для каждого срабатывания детектора (hit), которое происходит при любом виде взаимодействия любой частицы в назначенном объеме, определяется длина шага (Step), который вызвал срабатывание. В конце каждого шага определяется энергия (TotalEnergyDeposit), выделившаяся в результате взаимодействия, причем не для всех видов взаимодействия эта величина отлична от нуля. ЛПЭ определяется как отношение выделившейся энергии к длине шага, выражается в единицах кэВ/мкм. Поскольку не вся выделившаяся энергия поглощается веществом, в счетчиках не учитываются процессы, в которых частица теряет энергию на образование вторичного тормозного излучения. Поскольку плотность всего объекта однородна, а поглощенная доза есть отношение поглощенной энергии к массе слоя, то, следовательно, можно оперировать понятием поглощенной энергии, которая будет выражать поглощенную дозу в некоторых условных единицах.

Для вычисления фактора качества использованы два подхода. Согласно первому из них для каждой частицы, испытавшей взаимодей-

ствие в облучаемом слое, рассчитывается значение поглощенной энергии и линейной передачи энергии. Средний фактор качества рассчитывается согласно выражению

$$\langle Q \rangle = \frac{\sum_i D_i Q(L_i)}{\sum_i D_i}, \quad (1)$$

где D_i – поглощенная в результате i -го взаимодействия поглощенная доза, а $Q(L_i)$ – коэффициент качества частицы, испытавшей данное взаимодействие, рассчитанный исходя из значения ЛПЭ. Данный подход тесно связан с микродозиметрическим определением коэффициента (фактора) качества, однако не зависит от выбора размеров объема, в котором определяются микродозиметрические величины, что приводит к некоторому усреднению результата и слабой применимости подхода в области малых доз. С другой стороны, он отличается большей точностью от второго подхода, симулирующего радиобиологические эксперименты, в которых результаты наблюдений усредняются по большому количеству клеток. На этом основании многие радиобиологи считают возможным использовать значения ЛПЭ, усредненные не по поглощенным дозам, а по количеству частиц. При таком подходе вычисляется среднее значение ЛПЭ по всем актам взаимодействия

$$\langle L \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i, \quad (2)$$

а затем по средним ЛПЭ определяется коэффициент качества. Для расчета фактора качества (Q) используется следующая зависимость от значений ЛПЭ (L), рекомендованная МКРЗ в 92-й публикации [13]:

$$Q(L) = \begin{cases} 1, & L < 10 \text{ кэВ} / \text{мкм}, \\ 0.32L^{-2.2}, & 10 \leq L \leq 100 \text{ кэВ} / \text{мкм}, \\ 300 / \sqrt{L}, & L > 100 \text{ кэВ} / \text{мкм}. \end{cases} \quad (3)$$

Исходя из выражения (3), второй подход должен приводить к меньшим значениям фактора качества при облучении протяженных объектов, т.е. там, где велико количество взаимодействия тех частиц, которые обладают низкими значениями ЛПЭ, т.е. электронов. Однако при этом не учитывается, что выделяются различные энергии, и тем самым плотность ионизации вокруг точек, в которых произошли события больше, а следовательно, больше биологический эффект.



2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 и 2 представлена зависимость фактора качества фотонов от их энергии для двух разных толщин слоя – 0.1 мм (рис. 1) и 10 мм (рис. 2), рассчитанного по формулам (1) и (2):

$$\langle Q \rangle = \frac{\sum_i D_i Q(L_i)}{\sum_i D_i},$$

где i – каждое событие; $Q(\langle L \rangle)$ – по среднему значению ЛПЭ. Эти значения моделируют два крайних варианта радиобиологических экспериментов: облучения монослоя клеток и раствора клеток в питательной среде.

При энергиях выше 10 МэВ сечение фото-ядерных реакций становится достаточным, чтобы образовавшиеся частицы и ядра с высокими

значениями ЛПЭ повлияли на оценку фактора качества. Максимальное значение приходится на энергии фотонов около 25 МэВ, что соответствует максимальным сечениям фотоядерных реакций в области гигантского дипольного резонанса на легких ядрах. При энергиях свыше 25 МэВ фактор качества, рассчитанный по усредненным значениям ЛПЭ, существенно (в 3–4) меньше определенного в рамках другого подхода.

Для слоя 0.1 мм (см. рис. 1) фактор качества, посчитанный первым способом, достигает значения 16, для второго – 12. Оба значения соответствуют энергии ~26 МэВ. Для более толстого слоя в 10 мм (см. рис. 2) значения фактора качества не так высоки и составляют 4 для первого способа и энергии 26 МэВ и 3 для второго способа и энергии 23 МэВ.

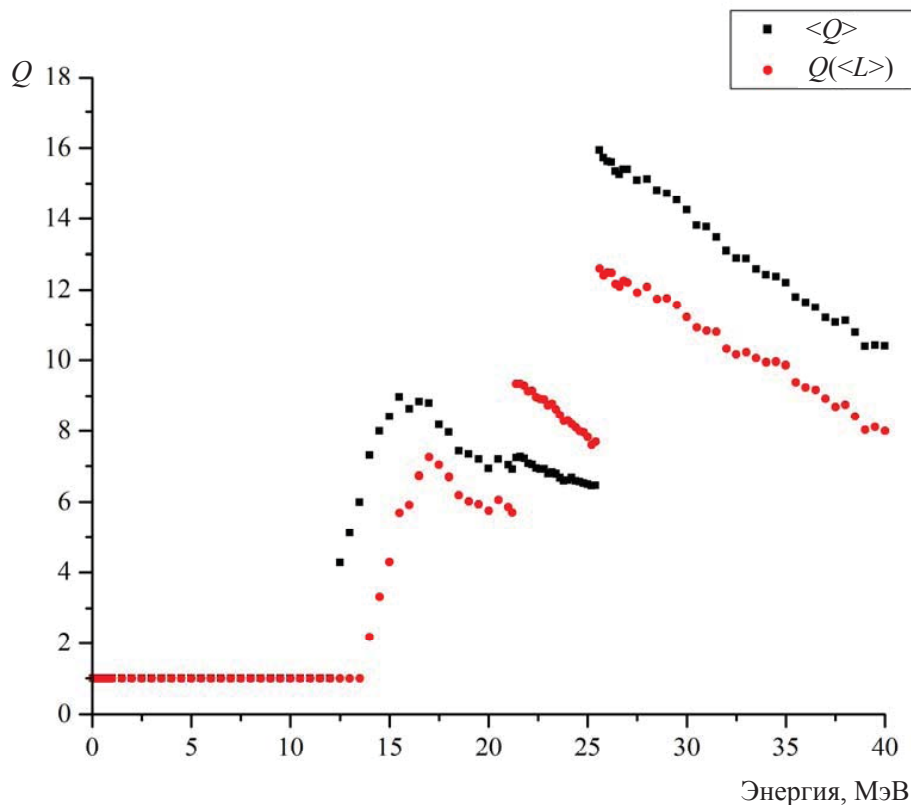


Рис. 1. Зависимость фактора качества фотонов от их энергии для толщины слоя 0.1 мм

Для толстых слоев, в которых существенно взаимодействие вторичных электронов, наблюдается описанная выше тенденция: $\langle Q \rangle$ больше, чем $Q(\langle L \rangle)$, однако для тонких слоев, в диапазоне энергий 20–25 МэВ, ситуация обратная. По нашему мнению, данная ситуация связана со следующими обстоятельствами: в данной об-

ласти энергий, которая примерно соответствует максимуму гигантского дипольного резонанса, количество актов взаимодействия электронов с низкими значениями ЛПЭ, много меньше, чем тяжелых заряженных частиц. Таким образом, среднее значение ЛПЭ смещается в область максимума функции $Q(L)$ (см. формулу (3)).

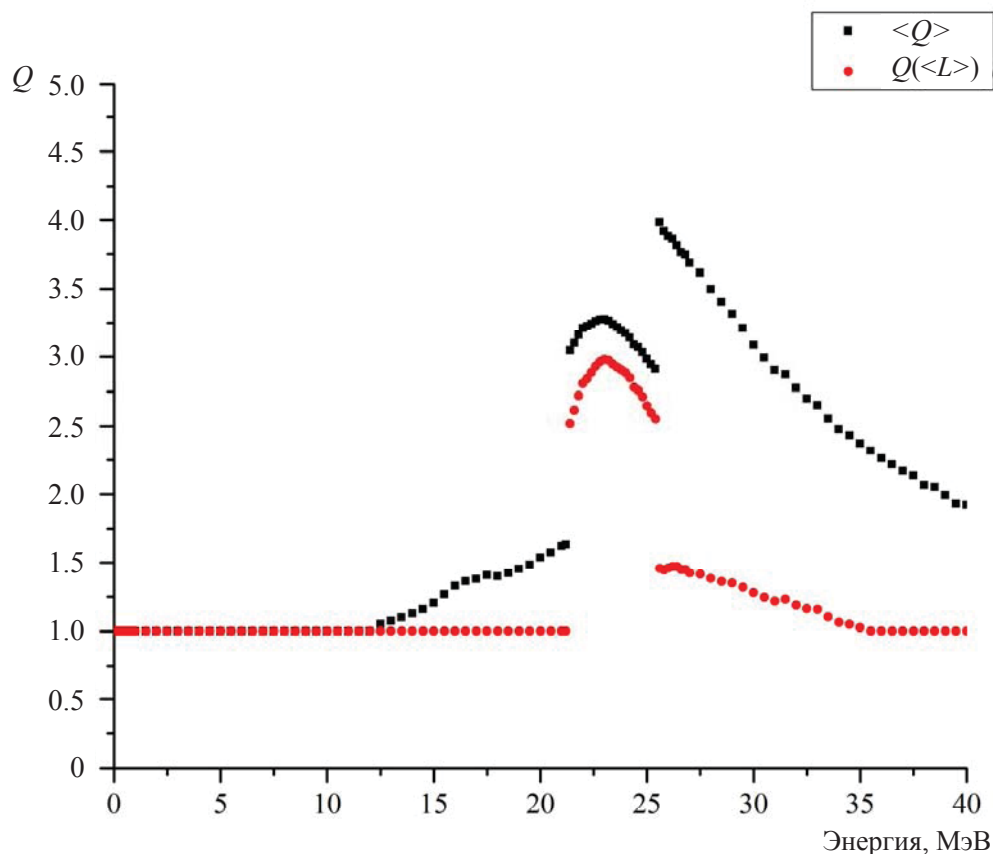


Рис. 2. Зависимость фактора качества фотонов от их энергии для толщины слоя 10 мм

Заключение

В работе методом компьютерного моделирования исследован процесс транспорта монохроматического фотонного излучения через объекты, моделирующие биологические структуры при проведении экспериментов по определению относительной биологической эффективности. Определены значения линейной передачи энергии всех типов излучений, индуцированных в облучаемом объекте. Исследована энергетическая зависимость фактора качества, рассчитанная в рамках следующих моделей: по среднему значению ЛПЭ всех частиц, по распределению ЛПЭ для каждой частицы. Показано, что в рассматриваемых слоях в результате образования тяжелых частиц с высоким значением ЛПЭ фактор качества фотонов существенно (в 3–15 раз в зависимости от толщины слоя) отличается от рекомендованного для фотонов значения, равного 1. Результаты вычислений свидетельствуют о сильной зависимости фактора качества как от толщины облучаемого объекта, так и от способа определения.

Список литературы

1. *Belousov A., Bliznyuk U., Chernyaev A.* Evaluation of the average weighting factor in thin layer irradiation by bremsstrahlung // *Biomedicine and Biotechnology*. 2014. Vol. 2, №. 4. P. 80–84.
2. *Gudowska I., Brahme A., Andreo P., Gudowska I., Brahme A., Andreo P., Gudowski W., Kierkegaard J.* Calculation of absorbed dose and biological effectiveness from photonuclear reactions in a bremsstrahlung beams of end point 50 MeV // *Phys. Med. Biol.* 1999. Vol. 44. P. 2099–2125.
3. *Kawrakow I.* Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. I. EGSnrc, the new EGS4 version // *Med. Phys.* 2000. Vol. 27. P. 485.
4. *Sätherberg A., Johansson L.* Photonuclear production in tissue for different 50 MV bremsstrahlung beams // *Med. Phys.* 1998. Vol. 25. P. 683.
5. *Stewart R. D., Wilson W. E., McDonald J. C., Strom D. J.* Microdosimetric properties of ionizing electrons in water: a test of the PENELOPE code system // *Phys. Med. Biol.* 2002. Vol. 47. P. 79–88.
6. *Tunga C. J., Liua C. S., Wangc S. L., Changa J. P.* Calculations of cellular microdosimetry parameters for alpha particles and electrons // *Applied Radiation and Isotopes*. 2004. Vol. 61. P. 739–743.



7. Hsial Y., Stewart R. D. Monte Carlo simulation of DNA damage induction by x-rays and selected radioisotopes // *Phys. Med. Biol.* 2008. Vol. 53. P. 233–244.
8. Verhaegen F., Castellano I. A. Microdosimetric characterisation of 28 kV Mo/Mo, Rh/Rh, Rh/Al, W/Rh and Mo/Rh mammography X ray spectra // *Radiation Protection Dosimetry.* 2002. Vol. 99, №. 1–4. P. 393–396.
9. Karamitros M., Incerti S., Champion C. The Geant4-DNA project // *Rad. Onc.* 2012. March. Vol. 102. Suppl. 1. P. S191–S192.
10. Incerti S., Ivanchenko A., Karamitros M., Incerti S., Ivanchenko A., Karamitros M., Mantero A., Moretto P., Tran H. N., Mascialino B., Champion C., Ivanchenko V. N., Bernal M. A., Francis Z., Villagrasa C., Baldacchino G., Guèye P., Capra R., Nieminen P., Zacharotou C. Comparison of Geant4 very low energy cross section models with experimental data in water // *Med. Phys.* 2010. Vol. 37. P. 4692–4708.
11. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytraccek R., Cooperman G., Cosmo G., Degtyarenko P., Dell'Acqua A., Depaola G., Dietrich D., Enami R., Feliciello A., Ferguson C., Fesefeldt H., Folger G., Foppiano F., Forti A., Garelli S., Giani S., Giannitrapani R., Gibin D., Gómez Cadenas J. J., González I., Gracia Abril G., Greeniaus G., Greiner W., Grichine V., Grossheim A., Guatelli S., Gumplinger P., Hamatsu R., Hashimoto K., Hasui H., Heikkinen A., Howard A., Ivanchenko V., Johnson A., Jones F. W., Kallenbach J., Kanaya N., Kawabata M., Kawabata Y., Kawaguti M., Kelner S., Kent P., Kimura A., Kodama T., Kokoulin R., Kossov M., Kurashige H., Lamanna E., Lampén T., Lara V., Lefebure V., Lei F., Liendl M., Lockman W., Longo F., Magni S., Maire M., Medernach E., Minamimoto K., Mora de Freitas P., Morita Y., Murakami K., Nagamatu M., Nartallo R., Nieminen P., Nishimura T., Ohtsubo K., Okamura M., O'Neale S., Oohata Y., Paech K., Perl J., Pfeiffer A., Pia M. G., Ranjard F., Rybin A., Sadilov S., Di Salvo E., Santin G., Sasaki T., Savvas N., Sawada Y., Scherer S., Sei S., Sirotenko V., Smith D., Starkov N., Stoecker H., Sulkimo J., Takahata M., Tanaka S., Tcherniaev E., Safai Tehrani E., Tropeano M., Truscott P., Uno H., Urban L., Urban P., Verderi M., Walkden A., Wander W., Weber H., Wellisch J. P., Wenaus T., Williams D. C., Wright D., Yamada T., Yoshida H., Zschesche D. Geant4 – A Simulation Toolkit // *Nuclear Instruments and Methods A.* 2003. Vol. 506. P. 250–303.
12. Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Barrand G., Capra R., Chauvie S., Chytraccek R., Cirrone G. A. P., Cooperman G., Cosmo G., Cuttone G., Daquino G. G., Donszelmann M., Dressel M., Folger G., Foppiano F., Generowicz J., Grichine V., Guatelli S., Gumplinger P., Heikkinen A., Hrivnacova I., Howard A., Incerti S., Ivanchenko V., Johnson T., Jones F., Koi T., Kokoulin R., Kossov M., Kurashige H., Lara V., Larsson S., Lei F., Link O., Longo F., Maire M., Mantero A., Mascialino B., McLaren I., Mendez Lorenzo P., Minamimoto K., Murakami K., Nieminen P., Pandola L., Parlati S., Peralta L., Perl J., Pfeiffer A., Pia M. G., Ribon A., Rodrigues P., Russo G., Sadilov S., Santin G., Sasaki T., Smith D., Starkov N., Tanaka S., Tcherniaev E., Tome B., Trindade A., Truscott P., Urban L., Verderi M., Walkden A., Wellisch J. P., Williams D. C., Wright D., Yoshida H. Geant4 Developments and Applications // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 2006. Vol. 53, № 1. P. 270–278.
13. Relative Biological Effectiveness (RBE). Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (W_R). ICRP Publication 92 // *Annals of ICRP.* 2003. Vol. 33, № 4.