

Моделирование капсулированных источников с ^{75}Se с целью их потенциального использования в брахитерапии

А. В. Белоусов^{1,a}, А. А. Белянов¹, Г. А. Крусанов^{1,2}, А. П. Черняев^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра ускорителей и радиационной медицины.

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).
Россия, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^abelousovav@physics.msu.ru

Статья поступила 20.06.2017, подписана в печать 14.07.2017.

Физические характеристики радионуклида ^{75}Se делают его перспективным гамма-излучателем для применения в качестве закрытого брахитерапевтического источника. Данный радионуклид сочетает относительно низкоэнергетичное фотонное излучение, испускаемое при распаде, с достаточно большим периодом полураспада (около 120 дней) и возможность получения высокой удельной активности. Все это делает данный радионуклид привлекательным для брахитерапии с автоматическим введением. Целью настоящей работы является изучение дозиметрических характеристик ^{75}Se для его потенциального использования в брахитерапии с высокой и средней мощностью дозы. Согласно формализму TG-43 рассчитаны радиальная дозовая функция $g(r)$ и функция анизотропии $F(r, \theta)$. ^{75}Se в качестве радионуклида для брахитерапии закрытыми источниками обладает многими преимуществами по сравнению с широко применяемыми изотопами и может служить альтернативой иридиевым источникам.

Ключевые слова: брахитерапия, источники, селен-75, метод Монте-Карло, Geant 4, TG-43.

УДК: 53.06. PACS: 87.53.Dq.

Введение

В клинической брахитерапии используется несколько радионуклидов, испускающих фотонное излучение. Главным образом это ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{125}I и ^{103}Pd [1–4]. Предлагается использовать ^{153}Gd [5] в качестве источника фотонов промежуточных энергий. Некоторые авторы считают перспективным использование ^{131}Cs [6, 7] в качестве альтернативы йоду и палладию, а ^{169}Yb в брахитерапии с высокой мощностью дозы [8, 9]. Кроме того, предлагается использовать ^{57}Co [10] и ^{170}Tm [11, 12]. Однако эти радионуклиды обладают недостатками по сравнению с иридием. Иттербий обладает коротким периодом полураспада и поэтому неудобен для применения в клинической практике, несмотря на очевидное преимущество, связанное с высокой удельной активностью. ^{170}Tm обладает существенным вкладом тормозного излучения и «загрязнен» бета-излучением на расстояниях до 5 мм. Кроме того, гамма-постоянная ^{170}Tm почти на два порядка меньше чем у иридия, что при сравнимой мощности дозы требует увеличения размеров источника. Производство ^{57}Co весьма дорого, поскольку требует производства мишеней, обогащенных изотопом ^{57}Ni .

Возможной альтернативой иридию и перспективным кандидатом является ^{75}Se , который обладает клинически значимыми преимуществами, определяемыми его физическими свойствами: 1) период полураспада составляет около 119.78 дней; 2) возможно получение достаточно высокой удельной активности; 3) энергия основных испускаемых линий 121, 136,

265, 280 и 400 кэВ со средней энергией в районе 215 кэВ. ^{75}Se может быть получен в ядерных реакциях на элементах, не требующих изотопного обогащения. Более низкие энергии по сравнению с ^{192}Ir и тем более с ^{60}Co предъявляют существенно меньшие требования к радиационной защите. Таким образом, ^{75}Se является удачным кандидатом на роль источников для брахитерапии. Кроме того, следует отметить, что данный изотоп широко используется в качестве радионуклида для мобильных дефектоскопов и методики его получения и выделения достаточно отработаны с технической точки зрения.

Целью настоящей работы является расчет дозиметрических характеристик гипотетического источника для брахитерапии на основе радионуклида ^{75}Se . Радиальная дозовая функция и функция анизотропии вычисляются методом Монте-Карло с помощью собственного программного кода, написанного на основе библиотек Geant 4.

1. Материалы и методы

1.1. Распад ^{75}Se

^{75}Se распадается по схеме электронного захвата до стабильного изотопа ^{75}As . Основные испускаемые линии характеристического излучения имеют энергию ~ 11 кэВ и практически полностью поглощаются оболочкой капсулы. Энергия основных линий для испускаемых электронов не превышает 300 кэВ, и они практически полностью поглощаются внутри источника. Основные линии гамма-излучения: 66 кэВ (~ 1), 96 кэВ ($\sim 3,5$), 121 кэВ (~ 17), 136 кэВ (~ 59), 199 кэВ (~ 1), 264 кэВ (~ 59),

280 кэВ (~ 25), 303 кэВ (~ 1) и 400 кэВ (~ 11) (в скобках указано количество испущенных фотонов на 100 распадов). Полное количество испускаемых на 100 распадов фотонов ~ 178 . Средняя энергия испускаемых фотонов 215 кэВ. Мощность воздушной кермы $48.25 \text{ мкГр}/(\text{м}^2 \cdot \text{ГБк} \cdot \text{ч})$, что примерно в 2 раза меньше, чем у ^{192}Ir . Таким образом, требуемая удельная активность при сохранении такой же мощности дозы примерно в два раза выше. Для ослабления мощности дозы в 10^6 раз необходимая толщина свинца составляет ~ 4.2 см, тогда как для иридия ~ 10 см.

1.2. Получение ^{75}Se

В настоящее время селен-75 широко используется в качестве источника гамма-излучения для дефектоскопов. Основные реакции, в которых может быть получена значительная активность ^{75}Se , — $^{72}\text{Ge}(\alpha, n\gamma)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{73}\text{Ge}(\alpha, 2n\gamma)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{74}\text{Ge}(\alpha, 3n\gamma)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{74}\text{Ge}(^3\text{He}, 2n\gamma)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{74}\text{Se}(n, \gamma)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{76}\text{Se}(p, d)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{76}\text{Se}(d, t)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{76}\text{Se}(^3\text{He}, 4n\gamma)^{75}_{34}\text{Se}$, $^{75}\text{As}(p, n)^{75}_{34}\text{Se}$. Для использования в качестве источника для брахитерапии, во-первых, необходимо получить требуемую удельную активность (размеры капсул достаточно малы и масса активного вещества в них составляет порядка 0.05 г); во-вторых, крайне желательно не иметь радиоактивных изотопов, характеристики которых сильно отличаются от селена-75. Из этих соображений реакции на селене далеко не оптимальны, поскольку для получения высокой удельной активности необходимо выделение ^{75}Se среди других изотопов. Данная процедура достаточно трудоемка и очень дорогостояща. В реакциях на германии выделение химическим путем селена позволяет получить требуемую удельную активность, однако из-за наличия в природном германии большого количества изотопов, полученная смесь будет сильно «загрязнена» другими радиоактивными изотопами селена. В качестве альтернативы возможно использование изотопного обогащения германия, это снимет часть проблем, однако стоимость получения существенно возрастет. Нарботка в ядерных реакторах с помощью реакций радиационного захвата страдает теми же недостатками. Оптимальным представляется получение в реакциях на мышьяке. При энергии протонов менее 22 МэВ единственным радиоактивным изотопом селена является ^{75}Se . По оценкам с помощью программного комплекса TALYS выход в данной реакции составляет $Y = 2.53 \text{ ГБк}/(\text{мА} \cdot \text{ч})$. При облучении на сильноточном ускорителе с током порядка 500 мА в течение 100 ч накопленная активность составит около 120 ТБк, а удельная активность порядка может достигать 50 ТБк/г без дополнительной очистки выделенного вещества. Увеличив энергию протонов, можно существенно повысить выход, однако потре-

буется «охлаждение»¹, чтобы уменьшить интенсивность других изотопов селена. Из них наибольшей активностью обладает ^{72}Se с периодом полураспада около 9 дней и ^{73}Se с периодом полураспада около 40 минут.

1.3. Характеристики источника

Моделирование методом Монте-Карло выполнено для цилиндрического инкапсулированного стальным корпусом источника, похожего на источник для брахитерапии с высокой мощностью дозы на основе иридия — VariSourceTM. Его геометрия и размеры показаны на рис. 1. Активное ядро источника выполнено из чистого (химическая чистота более 99%) селена (плотность $\rho = 4.28 \text{ г/см}^3$). Изотопный состав: $^{75}\text{Se} \sim 33\%$, $^{74}\text{Se} \sim 66\%$, $^{76}\text{Se} \sim 1\%$, что соответствует получению в ядерных реакциях на мышьяке при облучении протонов с энергией 22 МэВ. Активное ядро окружено стальной оболочкой, ее массовый состав: Fe — 68%, Cr — 19%, Ni — 10%, Mn — 2%, Si — 1%, плотность $\rho = 8 \text{ г/см}^3$. Масса источника 0.0042 г, активность $\sim 2 \text{ ТБк}$, соответствующая мощность дозы $\sim 1 \text{ кГр/час}$, что в 2.5 раза выше, чем у источника ^{192}Ir VariSourceTM. Подробности вычисления радиальной дозовой функции и функции анизотропии можно найти в работе [13].

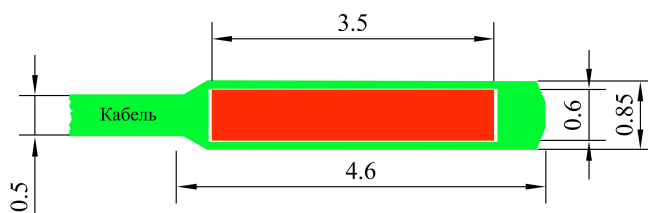


Рис. 1. Дизайн капсулы гипотетического источника с изотопом ^{75}Se (все размеры приведены в миллиметрах)

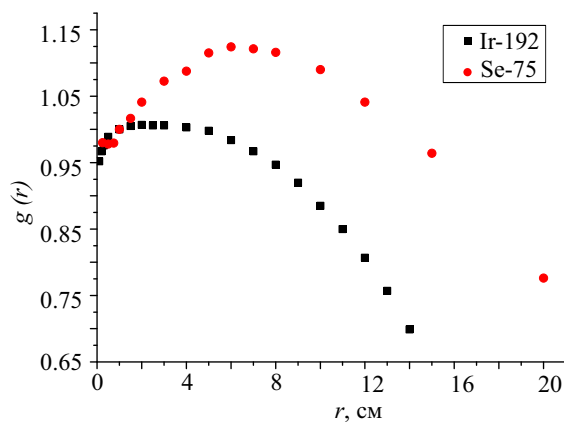


Рис. 2. Радиальная дозовая функция для иридиевого и селенового источников

¹Из-за разного периода полураспада ^{75}Se и других радиоактивных изотопов селена количество последних со временем будет уменьшаться гораздо быстрее, и их активность спустя некоторое время станет пренебрежимо мала.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена радиальная дозовая функция модельного источника с изотопом ^{75}Se и такого же по размерам источника с радионуклидом ^{192}Ir , вычисленная в шаровом водном фантоме радиуса 40 см. Дозное распределение предлагаемого источника имеет более ярко выраженный максимум, чем иридиевые источники. Смещение максимума на глубину 6–8 см позволит в перспективе разработать методики лечения с меньшей нагрузкой на критические органы. Угловая зависимость двумерной функции анизотропии для различных расстояний приведена на рис. 3. По сравнению с иридиевыми источниками

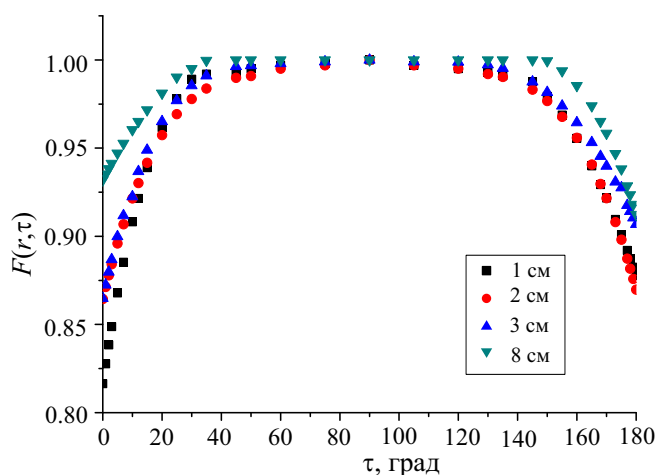


Рис. 3. Угловая зависимость двумерной функции анизотропии модельного источника для различных расстояний

функция анизотропии более равномерно покрывает область вокруг источника, что также может быть отнесено к достоинствам источника.

Заключение

^{75}Se в качестве радионуклида для брахитерапии закрытыми источниками обладает многими преимуществами по сравнению с широко применяемыми изотопами, такими как ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{137}Cs и неко-

торыми другими предлагаемыми радионуклидами, в частности ^{169}Yb . По сравнению с цезиевыми и кобальтовыми источниками требует существенно меньшей радиационной защиты, имеет больший период полураспада, чем иттербий. Может выступать в качестве альтернативы иридиевым источникам, по сравнению с которыми имеет несколько преимуществ. Радиальная дозовая функция обладает более ярко выраженным максимумом, что может позволить более гибко составлять планы лечения. Функция анизотропии более плавная и имеет хорошее дозиметрическое покрытие. Производство требуемой удельной активности возможно на пучках протонов высокой интенсивности. Методики выделения достаточно хорошо отработаны.

Список литературы

1. Nath R., Anderson L.L., Luxton G. et al. // Med. Phys. 1995. **22**. P. 209.
2. Rivard M.J., Coursey B.M., DeWerd L.A. et al. // Med. Phys. 2004. **31**. P. 633.
3. Venselaar J.L.M., Pérez-Calatayud J. A Practical Guide to Quality Control of Brachytherapy Equipment. Estro, 2004.
4. Nath R., Anderson L.L., Meli J.A. et al. // Med. Phys. 1997. **24**. P. 1557.
5. Enger S.A., Fisher D.R., Flynn R.T. // Phys. Med. Biol. 2013. **58**. P. 957.
6. Rivard M.J. // Med. Phys. 2007. **34**. P. 754.
7. Taylor R., Ibbott G., Lampe S. et al. // Med. Phys. 2008. **35**. P. 5861.
8. Medich D.C., Tries M.A., Munro J.J. // Med. Phys. 2006. **33**. P. 163.
9. Lymperspoulou G., Papagiannis P., Sakelliou L. et al. // Med. Phys. 2005. **32**. P. 3832.
10. Enger S.A., Lundqvist H., D'Amours M., Beaulieu L. // Med. Phys. 2012. **39**, N 5. P. 2342.
11. Ballester F., Granero D., Pérez-Calatayud J. et al. // Med. Phys. 2010. **37**, N 4. P. 1629.
12. Enger S.A., D'Amours M., Beaulieu L. // Med. Phys. 2011. **38**, N 10. P. 5307.
13. Белоусов А.В., Калачев А.А., Осипов А.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2014. № 6. С. 95. (Belousov A.V., Kalachev A.A., Osipov A.S. // Moscow University Phys. 2014. **69**, N 6. P. 535.)

Simulation of Se-75 encapsulated sources for their potential use in brachytherapy

A. V. Belousov^{1,a}, A. A. Belianov¹, G. A. Krusanov^{1,2}, A. P. Chernyaev^{1,2}

¹ Department of Accelerators' Physics and Radiation Medicine, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University. Moscow 119191, Russia.

E-mail: ^abelousovav@physics.msu.ru.

The physical characteristics of the radionuclide ^{75}Se make it a promising gamma radiant for its use as a sealed brachytherapy source. This radionuclide combines relatively low-energy photon radiation emitted at decay with a sufficiently long half-life (about 120 days), and the possibility of obtaining a high specific activity. All this makes this radionuclide attractive for brachytherapy with automatic injection. The aim of this work is to study the dosimetric characteristics of ^{75}Se for its potential use in brachytherapy with high and medium dose rates. According to the TG-43 formalism, a radial dose function $g(r)$ and the anisotropy function $F(r, \theta)$ are calculated. ^{75}Se as a radionuclide for brachytherapy with sealed sources has many advantages over widely used isotopes and can serve as an alternative to iridium sources.

Keywords: brachytherapy, sources, selen-75, Monte Carlo, Geant 4, TG-43.

PACS: 87.53.Dq.

Received 20 June 2017.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2018. 72, No. 3. Pp. .*

Сведения об авторах

1. Белоусов Александр Витальевич — канд. физ.-мат.наук., доцент; тел.: (495) 939-49-46, e-mail: belousovav@physics.msu.ru.
2. Белянов Александр Александрович — мл. науч. сотрудник.
3. Крусанов Григорий Андреевич — аспирант; тел.: (495) 939-49-46.
4. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат.наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-13-44.