

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, Geant4, 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 хорошо 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 Geant4.

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 мкГр/(м²·ГБк·ч), что примерно в 2 раза меньше, чем у ¹⁹²Ir. Таким образом, требуемая удельная активность при сохранении такой же мощности дозы примерно в два раза выше. Для ослабления мощности дозы в 10⁶ раз необходимая толщина свинца составляет ~ 4.2 см, тогда как для иридия ~ 10 см.

1.2. Получение ⁷⁵Se

В настоящее время селен-75 широко используется в качестве источника гамма-излучения для дефектоскопов. Основные реакции, в которых может быть получена значительная активность ⁷⁵Se, — ⁷²Ge($\alpha, n\gamma$)⁷⁵₃₄, ⁷³Ge($\alpha, 2n\gamma$)⁷⁵₃₄, ⁷⁴Ge(³He, 2n γ)⁷⁵₃₄Se, ⁷⁴Se(n, γ)⁷⁵₃₄Se, ⁷⁶Se(p, d)⁷⁵₃₄Se, ⁷⁶Se(d, t)⁷⁵₃₄Se, ⁷⁶Se(³He, 4n γ)⁷⁵₃₄Se, ⁷⁵As(p, n)⁷⁵₃₄Se. 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 ⁷⁵Se 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 ⁷⁵Se. По оценкам с помощью программного комплекса TALYS выход в данной реакции составляет $Y = 2.53$ ГБк/(мА·ч). При облучении на сильноточном ускорителе с током порядка 500 мА в течение 100 ч накопленная активность составит около 120 ТБк, а удельная активность может достигать порядка 50 ТБк/г без дополнительной очистки выделенного вещества. Увеличив энергию протонов,

можно существенно повысить выход, однако требуется «охлаждение»¹, чтобы уменьшить активность других изотопов селена. Из них наибольшей активностью обладает ⁷²Se и ⁷³Se с периодами полураспада около 9 дней и 40 минут соответственно.

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 $\rho = 4.28$ г/см³). Изотопный состав: ⁷⁵Se $\sim 33\%$, ⁷⁴Se $\sim 66\%$, ⁷⁶Se $\sim 1\%$, 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 $\rho = 8$ г/см³.

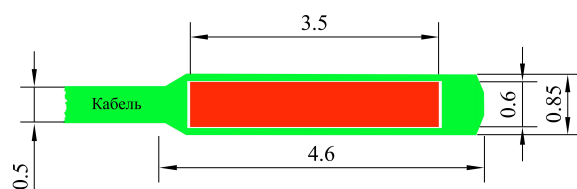


Рис. 1. Дизайн капсулы гипотетического источника с изотопом ⁷⁵Se (все размеры приведены в миллиметрах)

Масса источника 0.0042 г, активность ~ 2 ТБк, соответствующая мощность дозы ~ 1 кГр/час, что в 2.5 раза выше, чем у источника ¹⁹²Ir VariSourceTM. Подробности вычисления радиальной дозовой функции и функции анизотропии можно найти в работе [13].

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена радиальная дозовая функция модельного источника с изотопом ⁷⁵Se и такого же по размерам источника с радионуклидом ¹⁹²Ir, вычисленная в шаровом водном фантоме радиуса

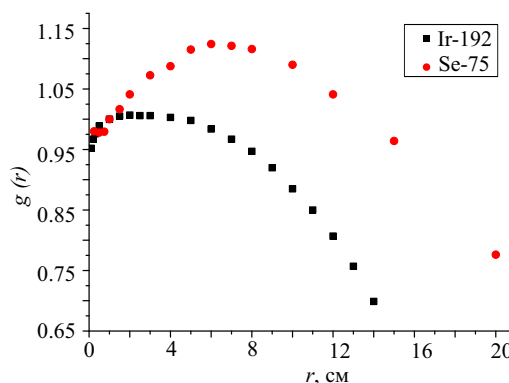


Рис. 2. Радиальная дозовая функция для иридиевого и селенового источников

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

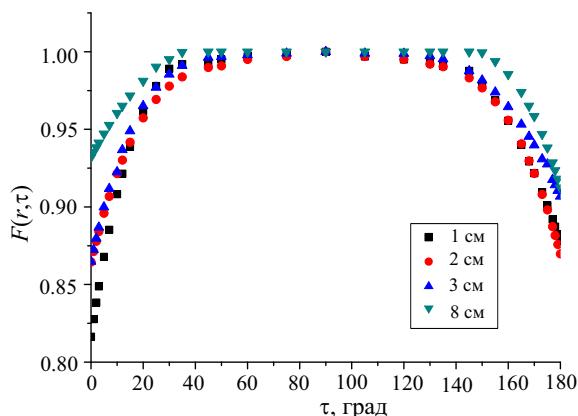


Рис. 3. Угловая зависимость двумерной функции анизотропии модельного источника для различных расстояний

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 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 некоторыми другими предлагаемыми радионуклидами, в частности ^{169}Yb . По сравнению с цезиевыми и кобальтовыми источниками требует существенно меньшей толщины радиационной защиты, имеет

большой 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. Lympersoulou G., Papagiannis P., Sakellidou 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. Bull.* 2014. **69**, N 6. P. 535.)

Simulation of ^{75}Se 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}

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

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

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

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

Keywords: brachytherapy, sources, selenium-75, Monte Carlo, Geant4, TG-43.

Received 20 June 2017. PACS: 87.53.Dq.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **72**, No. 3. Pp. 339–341.

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.