

Единица активности ^{68}Ga : прослеживаемость к государственному первичному эталону

Григорий Васильевич Жуков^{1✉}, Илья Владимирович Алексеев², Сергей Владимирович Коростин³, Николай Андреевич Токарев⁴, Кирилл Владимирович Белугин⁵, Анастасия Витальевна Озерская⁶, Регина Маратовна Ганиева⁷

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

³ ООО «НТЦ Амплитуда», Зеленоград, Москва, Россия, s.korostin@amplituda.ru

^{4, 5, 6} Федеральный Сибирский научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства, г. Красноярск, Россия

⁶ Красноярский государственный медицинский университет им. профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого, г. Красноярск, Россия, Ozerskaya_av@skc-fmba.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3988-7414>

⁷ ООО «РадиоМедСинтез», Уфа, Россия, r.ganieva@rmsintez.ru

¹ zgv@vniim.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8539-8668>

² i.v.alekseev@vniim.ru

⁴ tokarev_na@skc-fmba.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3335-0547>

⁵ Belugin_kv@skc-fmba.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3465-104X>

Аннотация. Исследованы вопросы применения радионуклида ^{68}Ga в медицинских учреждениях Российской Федерации для диагностики злокачественных новообразований. Актуальной является задача точного измерения активности ^{68}Ga для снижения дозовых нагрузок на пациентов и повышения эффективности диагностики. Рассмотрена калибровка транспортируемого эталонного дозкалибратора РИС-3А по активности ^{68}Ga . Описаны различные методы калибровки с обеспечением прослеживаемости к Государственному первичному эталону единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016: метод непосредственного сличения с установкой УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016 с использованием образца раствора ^{68}Ga ; с использованием гамма-спектрометра и источников на основе других радионуклидов, имеющих прослеживаемость единицы активности радионуклидов к ГЭТ 6-2016. Представлены бюджеты неопределённости калибровочного коэффициента при калибровках с помощью установки УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016 и гамма-спектрометра и ^{18}F . Оценена сходимость результатов измерений активности ^{68}Ga на эталонном дозкалибраторе с полученными разными методами калибровочными коэффициентами. Полученные результаты подтверждают применимость различных методов калибровки. Результаты исследования могут найти применение при обеспечении прослеживаемости к ГЭТ 6-2016 единиц активности других перспективных радионуклидов, внедряемых в медицинскую практику.

Ключевые слова: активность радионуклида, первичный эталон, калибровка

Для цитирования: Жуков Г. В., Алексеев И. В., Коростин С. В., Токарев Н. А., Белугин К. В., Озерская А. В., Ганиева Р. М. Единица активности ^{68}Ga : прослеживаемость к государственному первичному эталону // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 63–68. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-63-68>

^{68}Ga activity unit traceability to the Russian national primary radionuclide activity standard

Grigoriy V. Zhukov^{1✉}, Ilya V. Alexeev², Sergey V. Korostin³, Nikolay A. Tokarev⁴, Kirill V. Belugin⁵, Anastasia V. Ozerskaya⁶, Regina M. Ganiyeva⁷

^{1, 2} D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia

³ STC Amplituda LLC, Zelenograd, Moscow, Russia, s.korostin@amplituda.ru

^{4, 5, 6} Federal Siberian Research Clinical Centre of the Federal Medical-Biological Agency of Russia, Krasnoyarsk, Russia

⁶ Prof. V. F. Voino-Yasenetsky KrasSMU MOH Russia, Krasnoyarsk, Russia, Ozerskaya_av@skc-fmba.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3988-7414>

⁷ RMS LLC, Ufa, Russia, r.ganieva@rmsintez.ru

¹ zgv@vniim.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8539-8668>

² i.v.alekseev@vniim.ru

⁴ tokarev_na@skc-fmba.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3335-0547>

⁵ Belugin_kv@skc-fmba.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3465-104X>

Abstract. Russian hospitals widely use ^{68}Ga radionuclide for malignant tumors diagnostics. Therefore accurate ^{68}Ga activity measurements are important for optimizing patient's dose load and providing the diagnostic procedure efficiency. In this paper we consider the moveable standard dosecalibrator RIS-3A traceable by ^{68}Ga activity unit calibration. Two different traceability path implementations are considered: the direct comparison with the national primary radionuclide activity unit standard and calibration utilizing a gamma spectrometer and standard radioactive sources based on different beta-plus radionuclides. We present expanded uncertainty budgets for both calibration procedures, with direct usage of the national primary standard and via gamma spectrometer and ^{18}F standard source. The ^{68}Ga activity measurements results convergence for both calibration procedures is demonstrated using calibrated standard dosecalibrator. The validity of both procedures is demonstrated. The presented results have practical value and can be used in future work for traceable calibration of instruments for other newly used in radiopharmaceuticals radionuclides.

Keywords: radionuclide activity, primary standard, calibration

Введение. Галлий – лёгкий металл, элемент 13-й группы периодической таблицы с атомным номером 31. Галлий обладает 31 известным изотопом, из которых наибольший интерес для медицины имеет радиоактивный изотоп ^{68}Ga . С большой вероятностью (87,68 % [1]) ^{68}Ga претерпевает β^+ распад с излучением позитрона. В результате относительно небольшого периода полураспада (67,83 мин [1]) этот радионуклид пригоден для позитронно-эмиссионной томографии. В процессе развития позитронно-эмиссионной томографии наибольшую популярность в медицинских применениях получили короткоживущие ^{11}C и ^{18}F , легко встраивающиеся в органические молекулы. В настоящее время возрастающий интерес к ^{68}Ga связан с широким терапевтическим применением радиоактивных металлов. ^{68}Ga прекрасно подходит на роль сопутствующего диагностического радионуклида в паре с радиоактивным терапевтическим металлом ^{177}Lu . Радиоактивным изотопом ^{68}Ga можно пометить в процессе реакции хелатирования транспортные молекулы или антитела, которые применяют при диагностике онкологических заболеваний. Радиофармацевтические лекарственные препараты на основе ^{68}Ga используют для диагностики нейроэндокринных опухолей и онкологических заболеваний простаты [2–4].

Актуальность радионуклида ^{68}Ga подкреплена относительно высокой степенью доступности. На рынке присутствуют коммерческие генераторы на основе ^{68}Ge . Методика получения ^{68}Ge на циклотронах стандартизована Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) [5] и широко и успешно применяется. В России доступны отечественные генераторы ^{68}Ga (ЗАО «Циклотрон», г. Обнинск) и специализированные радиохимические боксы для работы с ними (ООО «НТЦ Амплитуда», г. Зеленоград).

В соответствии с требованиями законодательства в области обеспечения единства измерений средства измерений активности радиофармацевтических лекарственных препаратов должны иметь прослеживаемость к Государственному первичному эталону единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016. Основным средством измерений активности радиофармацевтических лекарственных препаратов является радиометр активности радионуклидов (дозкалибратор), представляющий из себя ионизационную камеру колодезного типа, внутри которой размещён флакон или шприц с радиофармпрепаратом. Транспортируемый

эталонный дозкалибратор используется для поверки и калибровки дозкалибраторов медицинских учреждений.

Особенностью измерений единицы активности радионуклидов является её специфичность для каждого радионуклида. Это обусловлено тем, что количество распадов в секунду в образце, т. е. активность образца в беккерелях, измеряется регистрацией возникающего в процессе распада излучения, а характеристики излучения специфичны для каждого радионуклида. В настоящее время известно несколько сотен различных радионуклидов, и только меньшая их часть наиболее востребована в промышленности и науке и измерена на ГЭТ 6-2016. Бурное развитие радиофармакологии в последние десятилетия создаёт вызовы для радионуклидной метрологии. Регулярно внедряются в клиническую практику новые короткоживущие радионуклиды с периодом полураспада от нескольких минут до нескольких дней. Измерение активности этих короткоживущих радионуклидов на ГЭТ 6-2016 и последующая калибровка эталонного дозкалибратора вызывает трудности вследствие необходимости быстрой доставки радионуклида от места производства до места измерений. В особых случаях можно применить сложные схемы калибровки эталонного дозкалибратора для обеспечения прослеживаемости к ГЭТ 6-2016. Таким особым случаем являются радионуклиды, претерпевающие β^+ распад с излучением позитрона, в гамма-спектре которых присутствует аннигиляционная линия 511 кэВ. Возможно передать единицу активности от одного β^+ -распадающегося радионуклида, единица активности которого прослеживается непосредственно к ГЭТ 6-2016, к другому β^+ -распадающемуся радионуклиду, для единицы активности которого такой прослеживаемости нет.

Рассмотрим следующие методы калибровки эталонного дозкалибратора [6]: метод непосредственного сличения с установкой из состава ГЭТ 6-2016 с использованием образца раствора ^{68}Ga ; с использованием гамма-спектрометра и источников на основе других радионуклидов, имеющих прослеживаемость единицы активности радионуклидов к ГЭТ 6-2016.

На рисунке представлены цепи метрологической прослеживаемости к ГЭТ 6-2016 результатов измерений активности ^{68}Ga на эталонном дозкалибраторе: 1 – калибровка с помощью установки УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016; 2, 3 – калибровка с использованием гамма-спектрометра и соответственно ^{22}Na и ^{18}F .

Цель статьи – представить результаты различных методов калибровки эталонного дозкалибратора РИС-3А по активности ^{68}Ga и сравнить результаты измерений активности ^{68}Ga на эталонном дозкалибраторе с калибровочными коэффициентами, полученными разными способами.

Калибровка с помощью установки УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016. Сложностью калибровки эталонного дозкалибратора по активности ^{68}Ga с помощью установки из состава ГЭТ 6-2016 является малый период полураспада (67,83 мин [1]) и большое время транспортировки радиофармпрепарата от места производства до места измерений. После появления генератора ^{68}Ga в Санкт-Петербурге и, соответственно, сокращения времени транспортировки проведены работы по калибровке эталонного дозкалибратора с помощью установки из состава ГЭТ 6-2016.

Для калибровки применяли герметично закрытый флакон объёмом 10 мл, содержащий 4,83 г раствора ^{68}Ga . Удельную активность ^{68}Ga в растворе измеряли на установке УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016 [7], реализующей абсолютный метод 4 π -счёта, предназначенный для измерения активности гамма-излучающих радионуклидов.

Устройство детектирования установки выполнено из двух сцинтилляционных детекторов NaI(Tl) диаметром 200 мм и высотой 100 мм. Для реализации 4 π -геометрии измеряемый радионуклидный источник помещали в колодец диаметром 42 мм и глубиной 10 мм, сделанный в одном из детекторов. Для снижения фона детекторы защищены корпусом из меди. При измерении активности радионуклида энергия фотонов источника практически полностью поглощается в материале кристаллов и преобразуется в энергию сцинтилляций – световых вспышек, которые регистрируют фотоэлектронными умножителями. Размер кристаллов подобран таким образом, чтобы обеспечить высокую эффективность регистрации фотонов с энергией до 2 МэВ.

Измерительный канал установки состоит из крейта NIM с модулями, компьютера и источника бесперебойного питания. Сигналы с блоков детектирования поступают в измерительный канал, усиливаются и оцифровываются с помощью диджитайзера (digitizer) N6720B производства CAEN (Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari S.p.A., Италия). Оцифрованный сигнал по оптической магистрали передачи данных поступает на компьютер для последующей обработки.

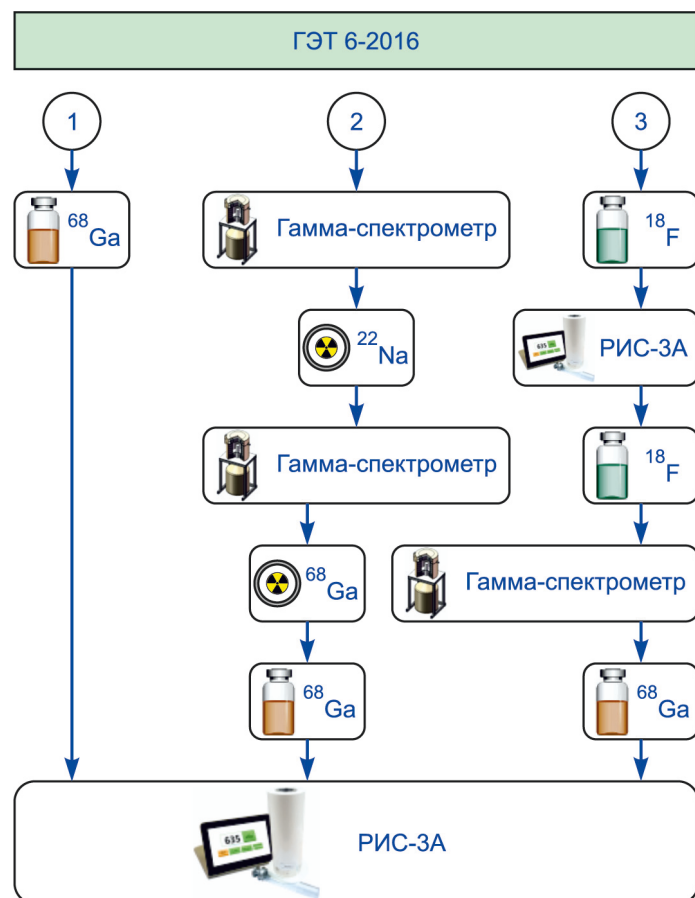
Для измерений применяли счётный образец в виде пробирки Эппендорфа объёмом 0,2 мл с аликвотой раствора ^{68}Ga массой 0,098 г. Единица удельной активности радионуклида (беккерель, Бк) на установке воспроизведена согласно формуле

$$A_{\text{уд}} = (n - n_{\text{ф}}) / (m \eta),$$

где n – скорость счёта импульсов от радионуклидного источника; $n_{\text{ф}}$ – скорость счёта импульсов фона; m – масса аликвоты; η – чувствительность установки, определённая для фотонного излучения ^{68}Ga методами численного моделирования (метод Монте-Карло).

В табл. 1 приведён бюджет неопределённости при калибровке с помощью установки УЭА-7 и весов из состава ГЭТ 6-2016,

где $u(x_i)$ – относительная стандартная неопределённость, u_c – суммарная относительная стандартная неопределённость (корень из суммы квадратов всех составляющих), U_p –



Прослеживаемость единицы активности радионуклидов к ГЭТ 6-2016:

1 – калибровка с помощью установки УЭА-7 из состава ГЭТ 6-2016; 2, 3 – калибровка с использованием гамма-спектрометра и соответственно ^{22}Na и ^{18}F

Traceability of the radionuclide activity unit to GET 6-2016:

1 – calibration using the UEA-7 from GET 6-2016; 2, 3 – calibration using a gamma spectrometer and, respectively, ^{22}Na and ^{18}F

Таблица 1

Бюджет неопределённости при калибровке с помощью установки УЭА-7

Источник неопределённости	Тип оценивания	$u(x_i)$, %
Скорость счёта:		
импульсов от счётного образца	A	0,01
импульсов фона	A	0,01
Чувствительность установки УЭА-7	B	0,7
Масса аликвоты и раствора во флаконе	B	0,12
Период полураспада ^{68}Ga [1]	B	0,36
u_c		0,8
U_p ($k = 2$)		1,6

относительная расширенная неопределённость с коэффициентом охвата k .

Калибровка с использованием гамма-спектрометра и ^{22}Na . Активность образца ^{68}Ga можно определить компарированием с радионуклидным источником известной активности, изготовленным из другого радионуклида – позитронного излучателя с использованием гамма-спектрометра в качестве компаратора по аннигиляционным фотонам с энергией 511 кэВ. Для реперного источника подходит источник фотонного излучения типа ОСГИ-А (регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (ФИФОЕИ) 58304-14) с радионуклидом ^{22}Na (квантовый выход позитронов 90,30 % [8]), поверенный в качестве рабочего эталона 1-го разряда.

При изготовлении из раствора ^{68}Ga счётных образцов в виде герметизированных скотчем дисков из фильтровальной бумаги, идентичных по форме источникам ОСГИ-А, наблюдается большой разброс значений активности ^{68}Ga (среднее квадратическое отклонение более 15 %). Разброс значений активности ^{68}Ga в счётных образцах может быть вызван сорбцией многозарядных ионов галлия на стенках флакона. Подобные эффекты наблюдались при высокoeffективной жидкостной хроматографии [9]. По этой причине калибровку эталонного дозкалибратора описанным методом не проводили.

Калибровка с использованием гамма-спектрометра и ^{18}F . Для измерений применяли образец, представляющий собой герметично закрытый флакон объёмом 10 мл с раствором элюата ^{68}Ga (далее – образец). В качестве реперного источника использовали образец раствора ^{18}F (квантовый выход позитронов 96,86 % [10]) в идентичном флаконе.

Таблица 2

Активность ^{68}Ga при $A_{F18} = 451 \text{ МБк}$

$r, \text{ м}$	$A_{\text{Ga68}}, \text{ МБк}$	K
2	741	1,44
3	595	1,37

Активность реперного источника ^{18}F измеряли эталонным дозкалибратором РИС-3А с калибровочным коэффициентом для ^{18}F , определённым во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева с помощью установок из состава ГЭТ 6-2016. Измерительные

Таблица 3

Бюджет неопределённости (по типу В) при калибровке с использованием гамма-спектрометра и ^{18}F

Источник неопределённости	$u(x_i), \%$
Активность реперного источника ^{18}F	1,2
Времена накопления спектров ^{18}F и ^{68}Ga	0,3
Квантовый выход фотонов с энергией 511 кэВ ^{18}F [10]	0,2
Квантовый выход фотонов с энергией 511 кэВ ^{68}Ga [1]	0,5
Периоды полураспада ^{18}F [10] и ^{68}Ga [1]	<0,05
Скорости счёта в пике полного поглощения ^{18}F и ^{68}Ga	<0,05
Измерение тока	0,2
u_c	1,3
$U_p (k=2)$	2,6

возможности ВНИИМ им. Д.И. Менделеева подтверждены участием в ключевых международных сличениях BIPM. RI(II)-K1.F-18 [11].

В качестве компаратора использовали комплекс спектрометрический МУЛЬТИРАД-гамма (регистрационный номер в ФИФОЕИ 68925-17). Образец ^{68}Ga и реперный источник ^{18}F последовательно размещали в одних и тех же позициях на расстояниях 2 и 3 м от блока детектирования спектрометрического комплекса для оптимизации его частотной загрузки и минимизации различий в геометрии измерений. Для обеспечения полной аннигиляции позитронов в месте излучения образцы помещали в стальной контейнер со стенкой толщиной 3 мм.

Время всех измерений фиксировали таймером, синхронизированным с тайм-сервером ВНИИФТРИ. Время набора спектра устанавливалось не менее 60 с и фиксировалось с точностью 1 с, что обеспечивало вклад стандартной неопределённости, возникающей за счёт распада радионуклида в процессе измерения, не более 0,2 %.

Активность образца ^{68}Ga рассчитывали для каждого расстояния до блока детектирования по следующей формуле:

$$A_{\text{Ga68}} = A_{\text{F18}} \exp(-\lambda_{\text{F18}} t_1) \frac{\lambda_{\text{Ga68}} t_{\text{Ga68}}}{1 - \exp(\lambda_{\text{Ga68}} t_{\text{Ga68}})} \times \frac{\lambda_{\text{F18}} t_{\text{F18}}}{1 - \exp(\lambda_{\text{F18}} t_{\text{F18}})} \frac{s_{\text{Ga68}} \eta_{\text{F18}}}{s_{\text{F18}} \eta_{\text{Ga68}}},$$

где A_{F18} – активность реперного источника ^{18}F , измеренная дозкалибратором РИС-3А; λ_{Ga68} , λ_{F18} – постоянные распада соответственно ^{68}Ga , ^{18}F ; t_1 – время, прошедшее с момента измерения активности реперного источника ^{18}F дозкалибратором РИС-3А до момента начала набора спектра фотонного излучения ^{18}F ; t_{Ga68} , t_{F18} – время набора спектров фотонного излучения радионуклидов соответственно ^{68}Ga , ^{18}F ; s_{Ga68} , s_{F18} – скорости счёта импульсов в пиках полного поглощения фотонов 511 кэВ в спектрах соответственно ^{68}Ga и ^{18}F ; η_{Ga68} , η_{F18} – квантовые выходы фотонов с энергией 511 кэВ, испускаемых радионуклидами ^{68}Ga и ^{18}F соответственно.

По определённым с учётом периода полураспада значениям A_{Ga68} рассчитывали калибровочный коэффициент дозкалибратора по формуле

$$K = A_{\text{Ga68}} / (I - I_{\text{ф}}),$$

где I – ток ионизационной камеры, создаваемый образцом с ^{68}Ga ; $I_{\text{ф}}$ – фоновый ток ионизационной камеры.

Таблица 4

Результаты измерений активности ^{68}Ga

Метод калибровки	$A_{\text{Ga68}}, \text{ МБк}$	$U_p (k=2), \%$
Калибровка с прямой прослеживаемостью к ГЭТ 6-2016 (прямой метод)	75,2	1,6
Калибровка с использованием гамма-спектрометра и ^{18}F (косвенный метод)	74,0	2,6

Значение калибровочного коэффициента ^{68}Ga приняли равным 1,41, что является средним значением по результатам, полученным при расстоянии $r=2$; 3 м до блока детектирования спектрометрического комплекса. Результаты измерений активности ^{68}Ga представлены в табл. 2.

Основной вклад в суммарную неопределённость калибровочного коэффициента вносит неопределённость измерений активности образца ^{68}Ga и неопределённость измерений тока ионизационной камеры. Вклады неопределённостей периода полураспада ^{68}Ga и измерений времени пренебрежимо малы.

Неопределённость измерений тока определяется нелинейностью аналого-цифровых преобразователей электрометра радиометра РИС-3А в диапазоне измеряемых активностей образца ^{68}Ga и реперного источника ^{18}F . Для определения нелинейности измерена зависимость тока ионизационной камеры от времени при распаде ^{18}F и проведено сравнение с уравнением радиоактивного распада. Нелинейность определена как максимальное отклонение результатов измерений от расчётных.

Бюджет неопределённости при калибровке с использованием гамма-спектрометра и ^{18}F представлен в табл. 3.

Сличение различных методов калибровки. Для сравнения калибровочных коэффициентов эталонного дозкалибратора РИС-3А, полученных различными методами, использовали флакон объёмом 10 мл, содержащий раствор ^{68}Ga . Результаты измерений активности радионуклида во флаконе с соответствующими неопределённостями представлены в табл. 4.

Сходимость результатов измерений определяли по формуле

$$E = |A_{\text{пр}} - A_{\text{к}}| / \sqrt{U_{A_{\text{пр}}}^2 + U_{A_{\text{к}}}^2},$$

где $A_{\text{пр}}$, $U_{A_{\text{пр}}}$ – активность раствора ^{68}Ga , измеренная с полученным прямым методом калибровочным коэффициентом, и расширенная неопределённость ($k=2$) соответственно; $A_{\text{к}}$, $U_{A_{\text{к}}}$ – активность раствора ^{68}Ga , измеренная с полученным косвенным методом калибровочным коэффициентом, и расширенная неопределённость ($k=2$) соответственно.

Значение критерия E составляет $0,53 < 1$, что свидетельствует о хорошей согласованности результатов измерений активности ^{68}Ga и применимости различных методов калибровки.

Заключение. Представлено описание различных методов калибровки эталонного дозкалибратора РИС-3А по активности ^{68}Ga . Проведено сравнение результатов измерений активности ^{68}Ga на эталонном дозкалибраторе с калибровочными коэффициентами, полученными разными методами. Подтверждена возможность калибровки эталонного дозкалибратора по активности ^{68}Ga с использованием гамма-спектрометра и ^{18}F . Результаты исследования могут найти применение при калибровке дозкалибраторов по активности других радионуклидов, имеющих короткий период полураспада.

Список источников

1. Bé M.-M., Chisté V., Dulieu C., etc., *Monographie BIPM-5 – Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2013, vol. 7, 246 p.

2. Ларенков А. А., Кодина Г. Е., Брускин А. Б. Радионуклиды галлия в ядерной медицине: радиофармацевтические препараты на основе изотопа ^{68}Ga // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2011. Т. 56. № 5. С. 56–73.

3. Наркевич Б. Я., Долгушин М. Б., Крылов В. В., Мещерякова Н. А., Кочетова Т. Ю. Радиационно-гигиеническое обеспечение радионуклидной тераностики рака предстательной железы // Медицинская физика. 2020. № 1(85). С. 97–113.

4. Meisenheimer M., Saenko Yu., Eppard E., Gallium-68: Radiolabeling of Radiopharmaceuticals for PET Imaging – A Lot to Consider, *Medical Isotopes*, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90615>

5. Gallium-68 cyclotron production, IAEA-TECDOC-1863, International Atomic Energy Agency, 2019, 68 p.

6. Коростин С. В., Божко Н. С., Сэлман С. В. Обеспечение прослеживаемости измерений активности радионуклидов в ядерной медицине // АНРИ. 2016. № 1(84). С. 44–48.

7. Алексеев И. В., Заневский А. В., Жуков Г. В., Мусеев Н. Н., Сэлман С. В., Терещенко Е. Е., Трофимчук С. Г., Харитонов И. А., Шильникова Т. И. Государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, удельной активности радионуклидов, потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-2016 // Измерительная техника. 2019. № 8. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-8-3-7>

8. Bé M.-M., Chisté V., Dulieu C., etc. *Monographie BIPM-5 – Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2010, vol. 5, 256 p.

9. Ларенков А. А., Марук А. Я., Кодина Г. Е. Особенности определения радиохимической чистоты препаратов ^{68}Ga : возможность сорбции ионных форм ^{68}Ga при использовании метода ВЭЖХ // Радиохимия. 2018. Т. 60. С. 535–542. <https://doi.org/10.1134/S0033831118060102>

10. Bé M.-M., Chisté V., Dulieu C., etc. *Monographie BIPM-5 – Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2004, vol. 1, 311 p.

11. Michotte C., Nonis M., Alekseev I. V., Kharitonov I. A., Tereshchenko E. E., Zanevskiy A. V., Keightley J. D., Fenwick A., Ferreira K., Johansson L., Capogni M., Carconi P., Fazio A., De Felice P., *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, vol. 109, pp. 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.11.087>

References

1. Bé M.-M., Chisté V., Dulieu C., etc. *Monographie BIPM-5 – Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2013, vol. 7, 246 p.
2. Larenkov A. A., Kodina G. E., Bruskin A. B., Gallium Radionuclides in Nuclear Medicine: Radiopharmaceuticals Based on ^{68}Ga , *Medical Radiology and Radiation Safety*, 2011, vol. 56, no. 5, pp. 56–73. (In Russ.)
3. Narkevich B. Ya., Dolgushin M. B., Krylov V. V., Meshcheryakova N. A., Kochetova T. Yu., Radiation-Hygienic Provision Of Radionuclide Theranostics Of Prostate Cancer, *Medical Physics*, 2020, no. 1(85), pp. 97–113. (In Russ.)

4. Meisenheimer M., Saenko Yu., Eppard E., Gallium-68: Radiolabeling of Radiopharmaceuticals for PET Imaging – A Lot to Consider, *Medical Isotopes*, 2019.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.90615>
5. Gallium-68 cyclotron production, IAEA-TECDOC-1863, International Atomic Energy Agency, 2019, 68 p.
6. Korostin S., Bozhko N., Sepman S., Traceability support of activity measurements of the radionuclides in the nuclear medicine, *ANRI*, 2016, no. 1(84), pp. 45–48. (In Russ.)
7. Alekseev I. V., Zanevskii A. V., Zhukov G. V., Moiseev N. N., Sepman S. V., Tereshchenko E. E., Trofimchuk S. G., Kharitonov I. A., Shil'nikova T. I., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, pp. 659–664.
<https://doi.org/10.1007/s11018-019-01675-1>
8. Bé M.-M., Chisté V., Dulieu C., etc. *Monographie BIPM-5 – Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2010. vol. 5, 256 p.
9. Larenkov A. A., Maruk A. Y., Kodina G. E., *Radiochemistry*, 2018, vol. 60, pp. 535–542. (In Russ.)
<https://doi.org/10.1134/S0033831118060102>
10. Bé M.-M., Chisté V., Dulieu C., etc. *Monographie BIPM-5 – Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2004. vol. 1, 311 p.
11. Michotte C., Nonis M., Alekseev I. V., Kharitonov I. A., Tereshchenko E. E., Zanevskiy A. V., Keightley J. D., Fenwick A., Ferreira K., Johansson L., Capogni M., Carconi P., Fazio A., De Felice P., *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, vol. 109, pp. 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.11.087>

Статья поступила в редакцию 17.05.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 17.06.2022.
The article was submitted 17.05.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 17.06.2022.