

Ученому секретарю диссертационного совета

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

190005, РФ, Санкт-Петербург,

Московский пр., д. 19

К.В. Чекирде



ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора химических наук Алексеева Игоря Евгеньевича

по диссертации Жукова Григория Васильевича на тему:

«Метрологическое обеспечение измерений активности гамма-излучающих
радионуклидов»,

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

В работе Жукова Григория Васильевича, посвященной разработке и исследованию нового типа вторичных эталонов гамма-излучения, продолжены традиции отечественной метрологической школы, заложенные основателями радиологической лаборатории Главной палаты мер и весов Л.С. Коловрат-Червинским и Л.Н. Богоявленским.

Написанная прекрасным языком, цельная, строго выстроенная диссертационная работа состоит из введения, пяти глав (каждая из которых завершается выводами), заключения, списка сокращений, приложений и списка литературы, включающего 92 библиографических ссылки.

Общий объём работы составляет 131 страницу машинописного текста, включая 49 рисунков и 43 таблицы.

Цель и методология, научная новизна и практическая значимость работы, основной задачей которой является повышение точности гамма-

спектрометрических измерений в атомной промышленности, медицине, радиоэкологии, других областях науки и промышленности, четко обоснованы во вступительной части диссертации.

Автором отмечено, что до начала диссертационного исследования вторичные эталоны (точечные радионуклидные источники фотонного излучения), с помощью которых возможна поверка рабочих эталонов 1 разряда единицы активности радионуклидов, отсутствовали в Государственной поверочной схеме.

В Главе 1 проведена всесторонняя оценка состояния метрологического обеспечения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов, включая анализ:

- неопределённости проводимых измерений;
- схемы передачи единиц активности от государственного первичного эталона радиометрическим установкам;
- состояния эталонной базы и метрологических характеристик существующих отечественных эталонов;
- калибровочных и измерительных возможностей ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и зарубежных национальных метрологических институтов в области измерений активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения.

В Главе 2 изложены теоретические основы метода $4\pi\gamma$ -счёта, корректно обоснована его применимость и принципиальные возможности для определения активности радионуклидов в точечных источниках фотонного излучения, разработан алгоритм определения скорости счёта импульсов с учётом мёртвого времени, методом численного моделирования Монте-Карло определена чувствительность установки УЭА-7 (из состава первичного эталона ГЭТ 6-2016) для 23 радионуклидов (от ^{18}F до ^{228}Th в равновесии с дочерними продуктами распада) с различным энергетическим спектром фотонов, показаны возможные варианты совершенствования метода $4\pi\gamma$ -счёта для оценки единиц активности радионуклидов.

В Главе 3 разработаны и обоснованы основные положения методики измерений активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта с использованием объединенных в единый «регистратор» двух сцинтилляционных детекторов.

Приведены результаты экспериментальных исследований счётных образцов ^{68}Ga , $^{166\text{m}}\text{Ho}$ и ^{241}Am , на основании которых составлен бюджет неопределённостей измерений активности радионуклидов, оценены относительное суммарное СКО и доверительные границы относительной погрешности, влияние мертвого времени, нестабильности фона, спектрометрических характеристик установки в низкоэнергетической области спектра на достоверность измерений.

В Главе 4 обоснована схема доказательств корректного определения активности гамма-излучающих радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта.

С использованием образцов на основе радионуклидов ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{177}Lu и ^{241}Am проведено сопоставление результатов воспроизведения активности и удельной активности методами $4\pi\gamma$ -счёта, методами $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений, которое доказало эквивалентность воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов различными методами, реализуемыми в ГЭТ 6-2016.

В Главе 5 обоснован выбор радионуклидов для создания вторичных эталонов - точечных радионуклидных источников фотонного излучения, который определяется достаточными для эксплуатации источников в течение нескольких лет периодами полураспада, обеспечением перекрытия энергетического диапазона типовых спектрометров и высокой интенсивностью гамма-квантов, испускаемых на акт распада.

Приведены результаты испытаний и метрологические характеристики точечных источников на основе восьми выбранных автором радионуклидов ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{228}Th , ^{241}Am , которые составляют около 70% от всего количества выпускаемых точечных радионуклидных источников фотонного излучения.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты проведенной работы, подчеркнута их актуальность, новизна и практическая значимость.

1. Обоснована применимость метода $4\pi\gamma$ -счёта для воспроизведения единицы активности гамма-излучающих радионуклидов в точечных радионуклидных источниках фотонного излучения.
2. За счет использования абсолютного метода измерений уменьшена относительная расширенная неопределённость воспроизведения единицы активности радионуклидов.
3. Разработана физико-математическая модель определения активности радионуклидов в диапазоне значений от $1 \cdot 10^1$ до $5 \cdot 10^5$ Бк с относительной расширенной неопределённостью ($k=2$) измерений от 0.8% до 5.0% для 23 радионуклидов с широкой вариацией энергий фотонов (50-3000 кэВ).
4. Обоснован выбор радионуклидов (^{68}Ga , $^{166\text{m}}\text{Ho}$ и ^{241}Am) для проведения экспериментальной верификации основных положений методики измерения активности радионуклидов методом $4\pi\gamma$ -счёта.
5. Доказана эквивалентность воспроизведения активности гамма-излучающих радионуклидов методами $4\pi\gamma$ -счёта, $4\pi\beta\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\alpha\text{-}\gamma$ -совпадений, $4\pi\beta$ -счёта, КХ- γ -совпадений с использованием образцов на основе радионуклидов ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{177}Lu и ^{241}Am .
6. Разработаны, испытаны и внедрены вторичные эталоны - точечные радионуклидные источники фотонного излучения ОСГИ-РТ на основе 8 радионуклидов: ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{228}Th , ^{241}Am .

Таким образом, решена актуальная научная задача - уменьшение относительной расширенной неопределённости воспроизведения и передачи единицы активности гамма-излучающих радионуклидов.

Внедрение полученных при выполнении диссертационной работы результатов позволило обеспечить потребности метрологических центров, калибровочных, поверочных и испытательных лабораторий во вторичных эталонах нового типа, повысить точность гамма-спектрометрических и

радиометрических измерений в атомной энергетике, науке, медицине, радиационной экологии и обеспечить единство измерений в области измерений активности радионуклидов.

Материалы диссертационного исследования представлены в 6 печатных работах, в том числе, в пяти статьях, опубликованных в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК, из них одна - без соавторов.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные положения, результаты и выводы работы.

В качестве замечаний, пожеланий и дискуссионных вопросов отмечу следующее.

1. На странице 54 приведен рис. 22, на котором показана эффективность установки УЭА-7 к фотонному излучению. Максимальная энергия фотонов не превышает 1500 кэВ.

Как оценивалась чувствительность установки для источников ^{228}Th , в генетической цепочки которого есть интенсивный переход (квантовый выход 99.9%) ^{208}Tl с энергией 2615 кэВ?

2. На странице 81 диссертации сказано, что «... разработаны счётные образцы из радионуклидов ^{68}Ga , $^{166\text{m}}\text{Ho}$, ^{241}Am для проведения экспериментальных исследований и верификации основных положений методики измерений...».

Как учитывался и оценивался вклад возможных радионуклидных примесей при разработке методики измерения активности радионуклидов методом 4лγ-счёта (в частности, при численном моделировании методом Монте-Карло чувствительности установки УЭА-7 для 23 радионуклидов - от ^{18}F до ^{228}Th в равновесии с дочерними продуктами распада)?

Отмечу, что и в последнем абзаце с. 85 также нет никаких упоминаний о радионуклидной чистоте использованных в международных ключевых сличениях препаратов.

3. Почему в качестве «показательного» примера достоверности методики определения активности препаратов методом 4лγ-счёта указан только один

нуклид, ^{60}Co , вариации энергетического спектра фотонов (1173 и 1332 кэВ) которого ничтожны?

Участвовал ли Ваш Институт в международных сличениях препаратов на основе других радионуклидов? Если да, то каких?

4. На странице 102 приведен перечень радионуклидов, пригодных для создания вторичных эталонов.

Как Вы полагаете, возможно ли его было бы дополнить и другими (более «удобными» в эксплуатации) долгоживущими (взамен ^{54}Mn и ^{88}Y) радионуклидами:

- ^{44}Ti (59.1 год) с энергиями фотонов 67.9 кэВ (квантовый выход 93%), 78.3 кэВ, (квантовый выход 96.4%), 1157 кэВ, (квантовый выход 99.9%);

- $^{108\text{m}}\text{Ag}$ (438 лет) с энергиями фотонов 79.2 кэВ (квантовый выход 6.78%), 433.9 кэВ, (квантовый выход 90.5%), 614.3 кэВ, (квантовый выход 89.8%), 722.9 кэВ, (квантовый выход 90.8%) - удельная активность $^{108\text{m}}\text{Ag}$ может составлять более 75 кБк/мг в результате короткого 10-ти дневного облучения в потоках тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ нейтрон $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

- «незаслуженно забытым» ^{227}Ac (21.8 года), в генетической цепочке которого масса альфа-излучающих радионуклидов с высоким квантовым выходом фотонного излучения, которые могут быть «параллельно» верифицированы методом 4 π -счета?

Отмеченные недостатки никоим образом не влияют на общую ценность проведенной работы.

Диссертационная работа Жукова Григория Васильевича «Метрологическое обеспечение измерений активности гамма-излучающих радионуклидов», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение» является завершённым исследованием, полностью удовлетворяющим критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, а ее автор

несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,
доктор химических наук, главный
научный сотрудник отделения технологии
изотопов Акционерного общества
«Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»



Алексеев Игорь
Евгеньевич

«17» июля 2025 г.

Почтовый адрес: 194021, РФ, Санкт-Петербург, 2-ой Муринский пр., д. 28.

Телефон: +7-962-6845381.

Email: iea-1960@khlopin.ru.

Подпись главного научного сотрудника отделения изотопов АО «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина» подтверждаю

Заместитель генерального директора по науке



Д.В. Рябков

Сведения об официальном оппоненте

по диссертации Жукова Григория Васильевича на тему:
«Метрологическое обеспечение измерений активности гамма-излучающих
радионуклидов»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

Фамилия	Алексеев
Имя	Игорь
Отчество	Евгеньевич
Дата рождения	
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень	Доктор химических наук
Ученое звание	Нет
Шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация	02.00.14 - радиохимия
Полное наименование организации, которая является основным местом работы	Акционерное общество «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»
Организационно-правовая форма	Акционерное общество
Ведомственная принадлежность	Государственная корпорация «Росатом»
Должность	Главный научный сотрудник
Структурное подразделение	Отделение технологии изотопов
Адрес организации	194021, РФ, Санкт-Петербург, 2-ой Муринский

	пр., д. 28.
Телефон рабочий	+7-962-6845381
Телефон мобильный (при наличии)	+7-962-6845381
Email	iea-1960@khlopin.ru

Список основных публикаций

в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации

за последние 5 лет (не более 5 публикаций)

1. I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I M. Kotina, I.S. Lomskaya, V.N. Muratova, N.V. Niyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, and E.V. Unzhakov. Precision measurement of ^{210}Bi β -spectrum // Phys. Rev. C 102, 064329 (2020). DOI:10.1103/PhysRevC.102.064329.
2. S.G. Kotlyarevskiy, R.I. Kan, V.B. Gorshkov, I.M. Maksimova, A.G. Volkova, E.V. Zakcharova, A.V. Stepanov, A.G. Volkovich, Yu.N. Simirsky, V.N. Dushin, I.E. Alekseev, V.G. Merkulov, E.V. Tchibisov, D.V. Kabanov. Carbon-14 in irradiated nuclear graphite: measurement issues. Experience gained in fabrication and calibration of reference standarts // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2021. NIMA 165350. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165350](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165350)
3. I.E. Alekseev, S.E. Belov, K.V. Ershov Estimating the Neutron Flux in a Spallation Experiment on the Konstantinov Nuclear Physics Institute's synchrotron // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2022, Vol. 86, No. 9, pp. 1088–1091. DOI: 10.3103/S1062873822090040
4. I.E. Alekseev, S.V. Bakhlanov, E.A. Chmel, A.V. Derbin, I.S. Drachnev, I.M. Kotina, M.S. Mikulich, V.N. Muratova, N.V. Nyazova, D.A. Semenov, M.V. Trushin, E.V. Unzhakov Silicon 4π spectrometer for β -decay electrons with energies up to 3~MeV // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A., 1051 (2023) 168242. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168242>
5. I.E. Alekseev, K.V. Ershov Transmutation of Am-241 at the Petersburg Nuclear Physics Institute synchrotron // Bulletin of the Russian Academy of Sciences:

Physics, 2024, Vol. 88, No 11, pp. 1817-1819.

DOI: 10.1134/S1062873824708316.

Доктор химических наук, главный
научный сотрудник отделения технологии
изотопов Акционерного общества
«Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»



Алексеев Игорь
Евгеньевич

Подпись главного научного сотрудника отделения изотопов АО «Радиевый
институт имени В.Г. Хлопина» подтверждаю

Заместитель генерального директора по науке



Д.В. Рябков