

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ И ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ^{90}Sr В КОРМАХ, ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ, ПРОДУКЦИИ ЖИВОТНОВОДСТВА И ВОДЕ

З. В. СТРЕЛЯЕВА¹⁾, А. В. БАРДЮКОВА¹⁾

¹⁾Институт радиобиологии, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Беларусь

В научно-исследовательских работах, мониторинге, аудитах применяются ряд методик выполнения измерений, которые в соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 подлежат совершенствованию с последующей верификацией и валидацией. Цель исследований: разработать и усовершенствовать метод определения содержания долгоживущих техногенных радионуклидов ^{90}Sr в объектах окружающей среды, основанных на приемах радиохимического выделения. В настоящее время для определения объемной активности ^{90}Sr в питьевой воде и продуктах питания используются Инструктивно-методические указания по радиохимическим методам определения радиоактивности в объектах ветнадзора, утвержденные Главным управлением ветеринарии Министерства сельского хозяйства СССР 24 августа 1984 г.), однако они морально и практически устарели. Для усовершенствования подходов в области радиохимии возникла необходимость разработки новой Методики выполнения измерений удельной и объемной активности ^{90}Sr в кормах, продуктах питания, продукции животноводства и воде. Выявлены и установлены происходящие отклонения в процессе выполнения измерений при применении испытаний, разработана надежная оценка неопределенности измерения. Проведены аналитические работы в лаборатории массовых анализов Института радиобиологии НАН Беларуси 98 проб разных матриц: пищевая продукция (молоко, картофель, зерно), костная ткань, вода разной активности с добавлением СОКК, для идентификации и статистических расчетов радиоактивного загрязнения изотопами ^{90}Sr . Существующие методические указания по определению стронция в пищевых продуктах нуждаются в совершенствовании, актуализации основных приемов проведения исследований, валидации и верификации данных. Ожидается высокий экономический эффект от замены устаревшей методики на модернизированную и усовершенствованную. Разработке документа предшествовала модернизация схем последовательности выполнения радиохимических испытаний: схема выделения радионуклидов из грубых и концентрированных кормов оксалатным методом. Установлены последовательность и содержания операций при подготовке и выполнении испытаний, включая требования по обеспечению безопасности труда и экологической безопасности, а также требования к квалификации операторов. На сегодняшний день существует нормативная документация, а методов определения превышений допустимых уровней в области радиологии нет или они устарели, или не обладают необходимой аттестацией в рамках Законодательной метрологии.

Ключевые слова: радиохимический анализ; радиохимическое разделение образца; фосфатный метод; оксалатный метод; образцы; ^{90}Sr .

Благодарность. Выражаем признательность инженерному составу лаборатории агроэкологии и массовых анализов Института радиобиологии за проделанную аналитическую помощь в рамках научно-исследовательской работы.

Образец цитирования:

Стреляева ЗВ, Бардюкова АВ. Совершенствование методики выполнения измерений удельной и объемной активности ^{90}Sr в кормах, продуктах питания, продукции животноводства и воде. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2026;1:99–107.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-99-107>

For citation:

Straliayeva ZV, Bardyukova AV. Improvement of methodological approaches for the determination of specific and volumetric activities of ^{90}Sr in feeds, food products, animal foods and water. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2026;1:99–107. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-1-99-107>

Авторы:

Зоя Вячеславовна Стреляева – кандидат сельскохозяйственных наук; ведущий научный сотрудник лаборатории агроэкологии и массовых анализов.

Алеся Владимировна Бардюкова – младший научный сотрудник лаборатории агроэкологии и массовых анализов.

Authors:

Zoya V. Straliayeva, PhD (agriculture); leading researcher at the laboratory of agroecology and mass analysis.

zoyalozovaya@yandex.by

Alesya V. Bardyukova, junior researcher at the laboratory of agroecology and mass analysis.

alesya.bardyukova@mail.ru

IMPROVEMENT OF METHODOLOGICAL APPROACHES FOR THE DETERMINATION OF SPECIFIC AND VOLUMETRIC ACTIVITIES OF ^{90}Sr IN FEEDS, FOOD PRODUCTS, ANIMAL FOODS AND WATER

Z. V. STRALIAYEVA^a, A. V. BARDYUKOVA^a

^a*Institute of Radiobiology, National Academy of Sciences of Belarus,
4 Fedyuninskaya Street, Gomel 246007, Belarus*

Corresponding author: Zoya V. Straliayeva (zoyalozovaya@yandex.by)

Delivery of scientific and methodological follow-up shall be based on the method's most recent revised edition, unless its use is deemed unreasonable or impossible. When necessary, additional clarifications should be developed to put it to practice and ensure the method's consistency. According to GOST ISO/IEC 17025-2019, a number of measurement procedures used in scientific research, monitoring practices and audits are subject to improvement, with subsequent verification and validation. Such are, for instance, the Guidelines for Radiochemical Methods of Determining Radioactivity in Veterinary Facilities, approved by General Veterinary Office, USSR Ministry of Agriculture, of August 24, 1984, Moscow. Existing methodological guidelines and recommended practices require further modernization and upgrade of the basic measurement approaches, as well as validation and verification of data. By establishing and introduction of scientific and organizational basics, technical means, rules and standards, required for laboratory research, one might expect a definitely high economical effect achieved through shifting from outdated procedure to an updated and improved one. The document's development was preceded by radiochemical analysis sequence revision: the process of radionuclide extraction from raw and concentrated feeds via oxalate procedure. Specified and adjusted are the sequence and scope of operations at preparation and implementation stages, including operational and environmental safety and operators' qualification requirements. The sequential steps of radiochemical analysis include converting of samples into a solution, isolation of the radionuclide, its radiometry with subsequent statistical processing of the results obtained. The methodological approaches used for the determination of plutonium in soil should take into account both the individual characteristics of samples and the nature of their radioactive contamination. The procedure contains all structural elements in accordance with Gosstandard Decree No. 61 of July 1, 2021, which replaced the existing GOST 8.010-2013 for authoring measurement procedures. The methodology includes the uncertainty assessment developed by us for this analytical method. The methods for determining radionuclides in the environment are used to ensure strict compliance with the safety requirements for foodstuffs, water, and feedstuffs in fee production sectors. As of today, there exist certain regulatory documentation but no methods of how to determine the limit exceedance in the field of radiology, or the methods are outdated or do not have the lawful certification by an authorized metrological agency.

Keywords: radiochemical analysis; radiochemical isolation; phosphate method; oxalate method; samples; ^{90}Sr .

Acknowledgement. We are expressing our sincere gratitude to the engineering staff of Agroecology and Mass Analysis Laboratory, Institute of Radiobiology NAS Belarus, for analytical research carried out as part of this research effort.

Введение

После аварии на ЧАЭС сложилась уникальная ситуация, характеризующаяся не только огромными площадями загрязненных территорий, но и разным составом радионуклидов, выброшенных из реактора, а также широким диапазоном мощностей доз хронического облучения. Радиозоологическая обстановка характеризуется сложностью и неоднородностью загрязнения территории альфа-, бета- и гамма-излучающими радионуклидами, присутствием радиоизотопов практически во всех компонентах экосистем и вовлечением их в геохимические и трофические циклы миграции. В результате испытания ядерного оружия и различных аварий на предприятиях ядерно-топливного цикла в биосфере появились ранее отсутствующие трансурановые элементы. Обладая большим периодом полураспада, они включаются в круговорот веществ и в течение тысячелетий будут представлять радиологическую опасность.

Радионуклиды могут оказаться в источнике воды, используемой человеком, по причине естественного присутствия радионуклидов в земной коре, а также вследствие техногенной деятельности человека – при испытаниях ядерного оружия, недостаточной очистке сточных вод предприятий атомной энергетики и промышленности или авариях на этих предприятиях, утерях или хищениях радиоактивных материалов, добыче и переработке нефти, газа, руд и др. Учитывая реальность такого рода загрязнения вод, в нормативы на питьевую воду вводятся требования по ее радиационной безопасности, а именно – общая α -радиоактивность (поток ядер гелия) не должна превышать 0,1 Бк/л, а общая β -радиоактивность (поток электронов) не выше 1,0 Бк/л (1 Бк соответствует одному распаду в секунду).

В качестве источников питьевого водоснабжения используется два типа природных вод:

- поверхностные (реки, озера, водохранилища);
- подземные (грунтовые, подрусловые, артезианские, трещинные воды кристаллических массивов).

Содержание радионуклидов в природных водах варьирует в очень широком диапазоне и зависит от состава вмещающих пород, локальных и региональных особенностей их геологического строения, типа вод, климатических условий и др.

Наиболее высокое содержание природных радионуклидов наблюдается в подземных водах, приуроченных к кислым магматическим породам, например, в водах трещиноватых гранитов. Подземные воды осадочного чехла могут иметь как низкую, так и высокую активность, что определяется не только содержанием природных радионуклидов в водовмещающих породах, но и гидравлической взаимосвязью разных водоносных горизонтов, проницаемыми тектоническими зонами, «окнами» в водоупорных пластах и др. При этом подземные воды одного горизонта на разных участках могут иметь различные уровни содержания природных радионуклидов и даже разный радионуклидный и микроэлементный состав. Содержание природных радионуклидов в поверхностных водах, как правило, незначительно и редко превышает значения уровня вмешательства.

Для определения объемной активности ^{90}Sr в питьевой воде используются «Инструктивно-методические указания по радиохимическим методам определения радиоактивности в объектах ветнадзора», (Утвержденная Главным управлением ветеринарии Министерства сельского хозяйства СССР 24 августа 1984 г., Москва). На сегодняшний день методика является недостаточно актуальной, поскольку за это время многое изменилось в радиохимических подходах. В связи с этим мы разработали новую Методику и совместили в ней определения радионуклидов в пищевой продукции и кормовой составляющей, а также в воде.

Существующие методические указания нуждаются в совершенствовании, актуализации основных приемов проведения исследований, валидации и верификации данных. При установлении и применении научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для проведения испытаний, ожидается определенно высокий экономический эффект от замены устаревшей методики на модернизированную и усовершенствованную. Данный вид работы проводился в 2021–2023 гг. и в итоге была представлена МВИ «Удельная и объемная активности стронция-90 в кормах, продуктах питания, продукции животноводства и воде».

Материалы и методы исследования

Методика определения ^{90}Sr в объектах ветнадзора путем радиохимического разделения разработана в соответствии с требованиями ГОСТ 8.010. Она предназначена для определения содержания радионуклида ^{90}Sr в комбикормах-конcentратах, силосе, сенаже, корнеклубнеплодах, грубых кормах (сено, солома), продуктах питания и воде с применением радиохимического разделения образцов.

Оценку показателей точности (правильности и прецизионности) МВИ и неопределенности измерений проводили по результатам измерений модельных проб: проб кормов из Ветковского р-на ОАО Халыч, МТК Шерстин; Хойникского р-на МТК Стреличево, КСУП Стреличево, зеленая масса МТК Дворище Хойникского р-на, зеленая масса КСУП Судково Хойникского р-на.

Точность характеристики МВИ определялись для образцов кормов и зеленой массы, продуктах питания и воде разной активности. Измерения проводились на низкофоновой альфа-бета установке *Canberra S5E*, диапазон измеряемой активности которой составляет 0,04–10000 Бк.

Анализ архивных данных результатов испытаний проб объектов ветнадзора для применения их в расчетных алгоритмах усовершенствованной методики. Произведен анализ архивных данных результатов испытаний проб объектов ветнадзора для применения их в расчетных алгоритмах совершенствования и модернизации методики. Стандарт *ISO/IEC 17025:2017* содержит требования к лабораториям, выполнение которых позволит им продемонстрировать компетентность и способность получать достоверные результаты.

Одним из компонентов, необходимых для функционирования лаборатории, являются методики. Для получения достоверного результата, согласно требованиям *ISO/IEC 17025:2017*, перед применением методики должны быть верифицированы, а в ряде случаев – валидированы. В стандарте требования по верификации и валидации методик регламентирует подраздел 7.2.

Методика измерений должна быть устойчивой (робастной), следовательно, небольшие отклонения в процедуре не должны быть причиной непредвиденно больших изменений результатов. Если такое может произойти, то должны быть приняты адекватные меры предосторожности или предупреждения. Желательно также, чтобы в процессе разработки стандартного метода измерений были приложены все усилия для устранения или уменьшения систематической погрешности.

В связи с отсутствием возможности в рамках данной работы организовать межлабораторный эксперимент в нескольких лабораториях проводилось внутрилабораторное исследование показателей точности с изменяющимися факторами «время + оператор». Накопление экспериментальных данных и обработка

МВИ осуществлялась на базе лаборатории агроэкологии и массовых анализов Института радиобиологии НАН Беларуси.

Отбор проб проводился сотрудниками лаборатории агроэкологии и массовых анализов в специально выбранных контрольных пунктах, расположенных на территории сельскохозяйственных предприятий, которые ведут свою деятельность на загрязненных радионуклидами землях в результате аварии на ЧАЭС. К объектам исследований относятся все виды фуража: грубые корма (солома, сено, сенаж и др.), сочные корма (трава, силос и др.), концентрированные корма (зернофураж, комбикорм, жмыхи и др.), продукты животноводства (мясо, молоко, кости).

Для исследования рекомендуется брать среднюю пробу. Для этого каждый объект отбирают в нескольких равных повторностях (не менее 3-х) с разных участков поля, скирды, бурта и т. д. с дальнейшим их объединением в одну, которую затем взвешивают и отправляют на исследование. Пробы молока усредняют путем тщательного перемешивания объединенного удоя. При отборе проб мяса и костей следует брать одну и ту же группу мышц и костей (ребра, шейные позвонки).

Результаты исследования и их обсуждение

Радиохимический анализ биологически значимых радионуклидов ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в современной системе радиационного контроля требует постоянного развития, которое определяется совершенствованием методов селективного выделения нуклидов, качеством формирования измеряемой конфигурации мишени и последующей регистрации ядерных излучений [1].

Использование менее трудоемких спектрометрических (инструментальных) методов имеет существенное ограничение, связанное с величинами измеряемой активности радионуклидов. Так, при высоких активностях ^{90}Sr (> 300 Бк/пробу) вполне допустимо его инструментальное определение с использованием специального математического аппарата выделения и обработки бета-спектра ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$) из суммарного спектра пробы, поскольку относительное влияние других радионуклидов является незначительным [2]. При более низких уровнях активности ^{90}Sr (соотносимых с временно допустимыми в сельскохозяйственной продукции), спектрометрический анализ, как правило, дает весьма завышенные результаты, что обусловлено присутствием в пробах природных изотопов ^{210}Pb и ^{210}Bi . Аналогичная ситуация имеет место при **гамма-спектрометрическом** определении содержания ^{241}Am в почве и других объектах окружающей среды в процессе измерения интенсивности линии 59,6 КэВ. Рассеянные гамма-кванты ^{137}Cs ($E_\gamma = 661$ КэВ) при высокой активности нуклида создают комптоновское распределение в области пика ^{241}Am , фактически исключая возможность его корректного количественного детектирования. Иногда влияние ^{137}Cs в этом случае подавляют путем предварительной радиохимической очистки проб при оксалатном соосаждении ^{241}Am с кальцием из растворов выщелачивания [3]. В последнем случае используется совмещенный инструментально-радиохимический метод.

Присутствие ^{90}Sr в окружающей среде является опасным показателем для живых организмов, поскольку этот радионуклид накапливается в костной ткани. Поэтому остается актуальным совершенствование методической базы для контроля содержания радионуклидов в почве, растениях, воде, продуктах питания и др.

В то время как ^{137}Cs в объектах окружающей среды определяют на гамма-спектрометрических комплексах, что сейчас уже не представляет больших трудностей при массовых анализах, определение ^{90}Sr требует применения радиохимического анализа. Эта необходимость обусловлена его радиационными характеристиками, по которым данный радионуклид проявляется только «чистым» бета-излучателем (то есть распад его ядер не сопровождается испусканием гамма-квантов). Как правило, радиохимическая аналитика предполагает последовательное выполнение отдельных стадий, включая предварительную подготовку (минерализацию, озоление, концентрирование и др.), перевод пробы в раствор, выделение и очистку радионуклида из раствора, изготовление препарата для радиометрического измерения активности. Кроме того, важным моментом всегда является определение химического выхода радионуклида с использованием в случае стронция его стабильного изотопа или радиоактивной метки ^{85}Sr . Радиоактивность стронция может быть определена регистрацией бета-частиц ($E_{\beta\text{max}} = 0,54$ МэВ), испускаемых при его распаде, или по дочернему ^{90}Y ($T_{1/2} = 64$ ч), который является также «чистым» бета-излучателем и обладает существенно большей максимальной энергией бета-излучения ($E_{\beta\text{max}} = 2,27$ МэВ).

Система радиационного контроля, которая в настоящее время ведет мониторинг ^{90}Sr как в агросфере, так и во всей природной среде, первоначально стала создаваться на методиках, где выделение данного радионуклида основывалось главным образом на реакциях осаждения [4; 5]. Наибольшее применение получило осаждение оксалатов или карбонатов щелочноземельных элементов на первом этапе радиохимической очистки стронция с последующим осаждением гидроксидов железа/алюминия и повторное осаждение оксалатов или карбонатов. Трудоемкость осуществления всех последовательных стадий осаждения

в многочасовой радиохимической очистке вещества определила поиск наиболее эффективных методических подходов.

Одним из результатов поиска наиболее производительных решений стала разработанная, а затем аттестованная методика выполнения измерений для определения ^{90}Sr в почве и растениях без разделения в системе «стронций – кальций»¹. Полный цикл радиохимических процедур при этом занимает не более 6 ч, поэтому данная методика хорошо себя зарекомендовала в радиологической практике и активно используется до сих пор при производстве массовых анализов, особенно для почв, имеющих высокое содержание железа. Значительное сокращение времени достигается исключением процедуры разделения «стронций – кальций» путем учета коэффициента регистрации в зависимости от массы получаемых мишеней (связанной с содержанием кальция) и времени накопления вторичного ^{90}Y .

Для определения ^{90}Sr предложены такие подходы, в которых применяются экстракционно-хроматографические сорбенты на основе замещенных таких краун-эфиров, как дибензо-18-краун-6 (ДЦГ28К6) и дицикло-18-краун-6 (ДБ18К6), а также их производные. Высокая степень избирательности для ^{90}Sr была достигнута применением в качестве экстрагента 4,4'(5')-ди-[(трет-бутил) циклогексан]-18-краун-6 (ДТБДЦГ18К6). Этот реагент проявляет хорошее сродство к ионам Sr^{2+} , образуя высокоселективные комплексные соединения в результате совпадения между диаметром полости краун-эфира (270–290 пм) и диаметром ионов стронция (240 пм). Метод экстракционной хроматографии – это вариант сочетания жидкостной экстракции с техникой хроматографии, выполняемой на колонке. При использовании данного метода химический выход стронция составляет не менее 95 % и существенно сокращается время (до 2 ч), затрачиваемое на анализ. Применение жидкостных сцинтилляционных счетчиков для регистрации ^{90}Sr или его дочернего ^{90}Y обуславливает самую высокую эффективность счета бета-излучения (60–70 %), достигающую практически 100 % при оптимальных условиях. Газопоточные пропорциональные счетчики не обеспечивают такой высокой эффективности регистрации, но отличаются достижением наиболее низких (менее 0,05 Бк) минимально детектируемых уровней активности (МДА) радионуклида.

В радиологической практике при производстве массовых анализов хорошо себя зарекомендовала и активно используется до сих пор методика определения ^{90}Sr в почве и растениях без разделения в системе «стронций – кальций». Для выявления радионуклидов в пробах «свежих» радиоактивных выпадений удельный вес собственно радиохимических операций значительно возрастает при использовании традиционных схем очистки. Определение ^{90}Sr в таких пробах требует очистки от мешающего изотопа ^{140}Ba , что предполагает выполнение достаточно трудоемкой стадии хроматного осаждения. В такой ситуации применение экстракционно-хроматографического метода, который значительно упрощает химические операции выделения радионуклидов, может оказаться наиболее эффективным.

Радиологические исследования должны проводиться по соответствующим методикам, разработанных на основании нормативных документов: норм и правил работы с ИИИ и РВ, ГОСТов и других документов, приведенных в списке использованной литературы. Методики радиационного контроля устанавливают совокупность операций и правил выполнения радиационных измерений и обработки их результатов для контролируемого объекта, необходимых для получения полной и адекватной измерительной информации о состоянии объекта в соответствии с требованиями нормативных документов. В них приводятся характеристики точности измерений искомой величины с помощью используемого средства измерения (СИ) и Методики выполнения измерений (МВИ), или Методики радиационного контроля (МРК). Все методики должны соответствовать метрологическим параметрам, которые включают неопределенность измерений (контроля) и оцениваются как интервал вокруг измеренного значения величины, внутри которого с заданной вероятностью находится ее истинное значение (расширенная неопределенность). При радиационном контроле для оценки результатов используется доверительная вероятность $P = 0,95$ (коэффициент охвата $K = 2$). Неопределенность измерений может выражаться как абсолютная (в единицах измеряемой величины), так и относительная (по отношению к измеренному значению величины). Приборы и аппаратура для радиационного контроля должны быть сертифицированы и поверены в установленном порядке (ГОСТ 27451-87, ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2019). Для проверки работоспособности и калибровки аппаратуры используются контрольные и эталонные источники для каждого вида излучения (типа ОСГИ – образцовые спектрометрические гамма-источники, ГОИ – государственные образцовые источники, СО – стандартные образцы и др.).

При выполнении радиометрических, радиологических исследований, радиационного контроля необходимо соблюдать правила техники безопасной работы с контрольными закрытыми источниками ионизирующих излучений, требования при работе с вредными веществами, пожарной безопасности, электробезопасности, соблюдать меры индивидуальной защиты и личной гигиены. Организация обучения персонала

¹МВИ.МН 1932-2003. Методика радиохимического определения удельной активности ^{90}Sr в почвах и растениях без разделения в системе стронций-кальций. Введ. 28.08.2003. Минск, 2003.

безопасности труда производится в соответствии с «Программой обучения и проверки знаний сотрудников, работающих с источниками ионизирующих излучений, по вопросам охраны труда и радиационной безопасности», утвержденной руководителем организации (учреждения). Исполнители должны быть проинструктированы о мерах безопасности при работе с открытыми источниками и контрольными закрытыми источниками ионизирующих излучений, работе на радиологическом комплексе «Прогресс» и другой аппаратуре в соответствии с инструкциями по их эксплуатации.

Для предотвращения распространения радиоактивного загрязнения выполнение таких операций, как пересыпание, сушка, отбор проб неизвестного радионуклидного состава, дробление, рассеивание на фракции, взятие навески для счетного образца необходимо проводить на эмалированных или пластмассовых поддонах в вытяжных шкафах. Одно из условий при отборе проб является предохранение их от вторичных загрязнений на всех этапах подготовки.

Спектроскопические методы анализа основаны на взаимодействии электромагнитного излучения с веществом. Это взаимодействие приводит к различным энергетическим переходам (электронным, колебательным, вращательным и т. д.), которые регистрируются экспериментально в виде поглощения излучения, отражения и рассеяния электромагнитного излучения. Спектроскопические методы анализа позволяют получать и исследовать сигналы в различных областях спектра электромагнитных волн – от коротких рентгеновских до длинных радиоволн. Для аналитических целей наибольшее значение имеют методы, оперирующие с излучением ультрафиолетового, видимого, инфракрасного диапазонов. Их подразделяют на атомную и молекулярную оптическую спектроскопию. По характеру взаимодействия электромагнитного излучения с веществом методы делят на абсорбционные (абсорбция – поглощение излучения), эмиссионные (эмиссия – испускание излучения), методы комбинационного рассеивания, спектроскопию отражения. Согласно квантовой теории, частица вещества (атом, молекула) может находиться только в определенных стационарных состояниях, которым отвечает некоторая дискретная последовательность энергетических уровней. Состояние с минимальной энергией называется основным, все остальные – возбужденными.

Переход частицы из одного стационарного состояния в другое сопровождается испусканием или поглощением кванта электромагнитного излучения – фотона. Каждому переходу отвечает монохроматическая спектральная линия определенной частоты (длины волны) и интенсивности. Частота и длина волны спектральной линии определяются выражением: $E_i - E_j = h\nu_{ij} = hc / \lambda_{ij}$, где E_i , E_j – энергии исходного и конечного состояний частицы; h – постоянная Планка; ν – частота; λ – длина волны; c – скорость света. Интенсивность спектральной линии определяется количеством лучистой энергии с частотой ν_{ij} , испускаемой или поглощаемой частицей в единицу времени. Совокупность спектральных линий, принадлежащих данной частице, составляет ее спектр. Если спектр обусловлен переходами, при которых $E_i > E_j$, его называют спектром испускания. Спектры, испускаемые термически возбужденными частицами, называют эмиссионными. Спектры испускания частиц, возбужденных другими источниками (квантами электромагнитного излучения, потоком электронов, электрическим полем и др.) принято называть спектрами люминесценции. Если спектр обусловлен переходами, при которых $E_i < E_j$, его называют спектром поглощения или абсорбционным. Линии, возникающие в результате переходов в основное или из основного состояния, а также соответствующие переходы, называют резонансными.

Спектры атомов в ультрафиолетовой (УФ), видимой и инфракрасной (ИК) спектральных областях, называют оптическими. Оптический диапазон обычно подразделяют на дальнюю (вакуумную) и ближнюю УФ-область, видимую область, ближнюю, среднюю и дальнюю ИК-область. Спектры атомов в УФ, видимой и ближней ИК-областях возникают при переходах внешних (валентных) электронов из одних энергетических состояний в другие. Атомные спектры имеют линейчатую структуру, число линий в спектре определяется вероятностью перехода, положение линии в спектре зависит только от природы атома. Наиболее интенсивные линии в спектре называют аналитическими, для атомов каждого элемента известны их характеристики, поэтому исследуя атомные спектры образца можно установить наличие в нем тех или иных элементов.

Назначение и область применения МВИ. Основным методом определения радиоактивности объектов ветнадзора является радиохимический анализ, позволяющий наиболее точно определять концентрации отдельных радионуклидов в продукции сельского хозяйства. Он состоит из ряда последовательных этапов: отбор проб исследуемых объектов; переводение их в раствор; выделение интересующего радионуклида; его радиометрирование с последующей статистической обработкой полученных результатов. Используемые для определения того или иного радиоизотопа методические приемы должны учитывать, как индивидуальную особенность исследуемых проб, так и характер их радиоактивного загрязнения. От правильного выполнения первых двух этапов радиохимического анализа во многом зависит объективность информации о концентрации радионуклидов в интересующих объектах. Поэтому четкое выполнение

правил отбора проб и их последующей обработки, включая переводение их в растворимое состояние, является непереносимым условием качественного выполнения радиохимического исследования.

В настоящей МВИ использованы ссылки на следующие технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации (далее – ТНПА): СТБ ИСО 5725-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений (части 1–6); ГОСТ 8.010-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения; ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования; ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты; Санитарные нормы и правила «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при осуществлении деятельности по использованию атомной энергии и источников ионизирующего излучения» Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.12.2013 № 137; Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности» и ГН «Критерии оценки радиационного воздействия» Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 213.

Точность измерения

1. Диапазон измерения активности: 0,04–10 000 Бк
2. Эффективность регистрации бета-излучения для геометрии C0: $(0,36 \pm 0,03) \text{ с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$
3. Погрешность измерения активности для штатной геометрии не превышает $\pm 30 \%$ ($P = 0,95$). Для других геометрий определяется применяемой методикой выполнения измерения и находится в диапазоне 15–50 % ($P = 0,95$).

Методы определения радионуклидов. Выбор методики определения любого радионуклида зависит, прежде всего, от особенностей объекта исследования, количества и изотопного состава других радиоактивных и нерадиоактивных компонентов в нем.

Значительное содержание и разнообразие макропримесей в объектах ветнадзора обуславливает и разнообразие применяемых методов предварительного концентрирования интересующих радионуклидов, из которых наибольшее распространение нашли методы осаждения (соосаждения), экстракции и ионного обмена. Дальнейшие стадии радиохимической очистки радиоизотопа зависят от радионуклидного состава анализируемых, проб. В период выпадения «свежих» (возраст до 1 года) стратосферных (тропосферных) осадков почти во всех видах кормов, помимо долгоживущих изотопов стронция-90 и цезия-137, будут присутствовать в значительных количествах такие радионуклиды, как Sr-89, Y-91, Zr-95, Nb-95, Rb-90, Ru-106, Rh-106, Sb-124, 125, Ce-141, 144 и другие радионуклиды, периоды полураспада которых лежат в пределах от 30 дней до 1–2 лет. При отсутствии «свежих» выпадений растительные объекты будут загрязнены в основном долгоживущими изотопами стронция-90, цезия-137, церия-144 и естественными радионуклидами свинца-210 (висмута-210), тория-234, радия-228 (актиния-228).

Приведенные методики определения наиболее значимых в биологическом отношении радионуклидов учитывают указанные выше особенности исследуемых объектов и характер радиоактивного их загрязнения.

Определение стронция-90. Стронций является элементом 2-й группы периодической системы элементов и в силу этого по своим химическим свойствам сходен с другими представителями этой группы – кальцием и барием. В радиохимическом анализе используются его соли: растворимые – нитрат, хлорид и труднорастворимые в воде оксалат, сульфат, карбонат; гидроксид стронция хорошо растворим в водных растворах, что позволяет отделять стронций от целого ряда других элементов, образующих труднорастворимые гидроксиды.

Стронций имеет более 10 радиоактивных изотопов, наиболее важными из которых являются ^{89}Sr ($T_{1/2} = 51 \text{ сут.}$, $E_\beta = 1,46 \text{ Мев}$) и ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28,6 \text{ г.}$, $E_\beta = 0,54 \text{ Мев}$). Во всех биопробах присутствует в значительных количествах кальций (0,5–5 г), а в виду близости его свойств со стронцием, процесс их разделения связан с определенными трудностями. Поэтому в каждой из предлагаемых методик стронций-90 определяется по его дочернему изотопу иттрию-90, находящемуся в состоянии радиоактивного равновесия.

В радиологической практике при производстве массовых анализов хорошо себя зарекомендовала и активно используется до сих пор методика определения ^{90}Sr в почве и растениях без разделения в системе «стронций – кальций». Для определения радионуклидов в пробах «свежих» радиоактивных выпадений удельный вес собственно радиохимических операций значительно возрастает при использовании традиционных схем очистки. Определение ^{90}Sr в таких пробах требует очистки от мешающего изотопа ^{140}Ba , что предполагает выполнение достаточно трудоемкой стадии хроматного осаждения. В такой ситуации применение экстракционно-хроматографического метода, который значительно упрощает химические операции выделения радионуклидов, может оказаться наиболее эффективным.

Заключение

По итогам исследования произведен анализ архивных данных результатов испытаний проб объектов ветнадзора для применения их в расчетных алгоритмах совершенствования и модернизации методики. Разработке документа предшествовала модернизация алгоритмов последовательности выполнения радиохимических испытаний: схема выделения радионуклидов из грубых и концентрированных кормов оксалатным методом и схема выделения радионуклидов из продуктов животноводства (молоко, мясо, кости, органы) фосфатным методом. Установлены последовательность и содержания операций при подготовке и выполнении испытаний, включая требования по обеспечению безопасности труда и экологической безопасности и требования к квалификации операторов.

Разработан документ МВИ «*Удельная и объемная активности стронция-90 в кормах, продуктах питания, продукции животноводства и воде. Методика измерений*». Описан процесс измерения, оценены характеристики и стандартные величины, проведен контроль точности результатов. Методика разработана в соответствии с требованиями ИСО/МЭК 17025:2019, пункта 7.2.1.5 основополагающего стандарта аккредитации «Валидация аналитических методик». Она содержит все структурные элементы в соответствии с Постановлением № 61 Госстандарта от 1 июля 2021 г., который был утвержден взамен существующего ГОСТа для написания методик выполнения измерений 8.010-2013.

В соответствии с требованиями Закона РБ «Об обеспечении единства измерений» от 11 ноября 2019 г. № 254-З разработанная методика направлена на метрологическую экспертизу в Брестский ЦСМС, для дальнейшего включения ее в Единый государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений (реестр методик).

Произведен расчет неопределенности измерений разработанной МВИ. В процессе оценки неопределенности измерений были рассчитаны значения и стандартные отклонения входных величин; произведен анализ корреляций; составлен бюджет неопределенности и т. д. В результате разработана надежная оценка неопределенности измерения, выраженная в Контрольных картах Шухарта. В методику включена разработанная нами оценка неопределенностей по данному методу исследований. Чтобы добиться сокращения неопределенностей, касаемых метода, применялся подход «Чем точнее метод, тем меньше разброс значений внутри интервала в 95 %».

Лаборатория, в которой проводятся испытания, аккредитована на независимость и техническую компетентность в соответствии с требованиями с ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. В область аккредитации лаборатории входят объекты испытаний: продукты питания, корма, вода питьевая.

Организованы и проведены теоретические и экспериментальные исследования по оценке показателей точности разработанной методики выполнения измерений. Экспериментально опробована методика выполнения измерений, сделан анализ соответствия показателей точности исходным требованиям, проведена обработка промежуточных результатов измерений и вычисление окончательных результатов, полученных с помощью данной методики выполнения измерений.

Существующие до нашей разработки «Инструктивно-методические указания по радиохимическим методам определения радиоактивности в объектах ветнадзора» (утверждена Главным управлением ветеринарии Министерства сельского хозяйства СССР 24 августа 1984 г., Москва), нуждались в совершенствовании и актуализации основных приемов проведения исследований, валидации и верификации данных. Согласно Закону «Об обеспечении единства измерений» от 11 ноября 2019 г. № 254-З, методики, применяемые в сфере государственного регулирования, подлежат обязательной аттестации в порядке, утвержденным агентством по техническому регулированию и метрологии.

Разработанные нами методики, после проведения обязательной метрологической экспертизы, будут внесены в Государственный информационный фонд аттестованных методик по обеспечению единства измерений.

Образцы, полученные с применением этих методик, могут также радиометрироваться на установках ДП-100 или УМФ-1500, кроме низкофоновых установок типа CANBERRA. Такого типа радиометры применяются во многих областных и республиканских радиологических и ветеринарных лабораториях, где проводятся аналитические работы по определению Sr-90 в фураже, продуктах животноводства, рыбе и воде. Данные методики уже сейчас очень ожидаемы, поскольку аккредитованные лаборатории не имеют права работать с методиками, не прошедшими метрологический контроль.

Библиографические ссылки

1. Москвин ЛН. *Проблемы радиохимического контроля на атомных электростанциях*. В: *Современные методы разделения и определения радиоактивных элементов*. Москва: Наука; 1989. 183 с.
2. Бахур АЕ, Мануилова ЛИ, и др. Стронций-90 в почвах: радиохимические и инструментальные методы определения. *Научно-информационный журнал по радиационной безопасности Анри*. 2003;1:20–28.

3. Бушуев АВ, и др. *Развитие γ -спектрометрической методики для контроля загрязненности почв ^{241}Am и Pu* . Препринт: МИФИ 013-96. Москва: [б. и.]; 1996. 88 с.
4. Марей АН, и др. *Методические указания по радиационному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды*. Москва: Минздрав СССР; 1980. 337 с.
5. Кузнецов АВ, и др. *Методические указания по определению содержания стронция-90 и цезия-137 в почвах и растениях*. Москва: [б. и.]; 1985.

References

1. Moskvina LN, et al. *Problemy radiohimicheskogo kontrolya na atomnykh elektrostanciyah* [Problems of radiochemical control at nuclear power plants]. In: *Modern Methods of Separation and Determination of Radioactive Elements*. Moscow: Nauka; 1989. 183 p. Russian.
2. Bahur AE, Manuilova LI, et al. *Stroncij-90 v pochvakh: radiohimicheskie i instrumental'nye metody opredeleniya* [Strontium-90 in soils: radiochemical and instrumental methods of determination]. *Henri's Scientific and Informational Journal on Radiation Safety*. 2003;1:20–28. Russian.
3. Bushuev AV, et al. *Razvitie γ -spektrometriceskoj metodiki dlya kontrolya zagryaznennosti pochv ^{241}Am i Pu* [Development of a γ -spectrometric technique for monitoring soil contamination with ^{241}Am and Pu]. Preprint: MIFI 013-96. Moscow: [publisher unknown]; 1996. 88 p. Russian.
4. Marey AN, et al. *Metodicheskiye ukazaniya po radiatsionnomu kontrolyu za soderzhaniyem radioaktivnykh veshchestv v ob'ekтах vneshney sredy* [Guidelines for Radiation Control of the Content of Radioactive Substances in Environmental Objects]. Moscow: Ministry of Health; 1980. 337 p. Russian.
5. Kuznetsov AV, et al. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu soderzhaniya strontsiya-90 i tseziya-137 v pochvakh i rasteniyakh* [Methodological guidelines for determining the content of strontium-90 and cesium-137 in soils and plants: methodological guidelines for radiological control]. Moscow: [publisher unknown]; 1985. Russian.

Статья поступила в редколлегию 26.01.2026.
Received by editorial board 26.01.2026.