

Медико-биологические проблемы жизнедеятельности

Научно-практический рецензируемый журнал

№ 1(33)
2025 г.

Учредитель

Государственное учреждение
«Республиканский научно-
практический центр
радиационной медицины
и экологии человека»

Журнал включен в

Перечень научных изданий
Республики Беларусь
для опубликования
диссертационных исследований
по медицинской
и биологической
отраслям науки
(31.12.2009, протокол 25/1)

Журнал зарегистрирован

Министерством информации
Республики Беларусь,
Свид. № 762 от 6.11.2009

Подписано в печать 26.03.25
Формат 60×90/8. Бумага мелованная.
Гарнитура «Times New Roman».
Печать цифровая. Тираж 120 экз.
Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 8,33.
Зак. 50.

Издатель ГУ «Республиканский
научно-практический центр
радиационной медицины
и экологии человека»
Свидетельство N 1/410 от 14.08.2014

Отпечатано в
КУП «Редакция газеты
«Гомельская праўда»
г. Гомель, ул. Полесская, 17а

ISSN 2074-2088

Главный редактор, председатель редакционной коллегии

А.В. Рожко (д.м.н., профессор)

Редакционная коллегия

В.С. Аверин (д.б.н., профессор, зам. гл. редактора),
В.В. Аничкин (д.м.н., профессор), В.Н. Беляковский (д.м.н.,
профессор), К.Н. Буздакин (к.т.н., доцент), Н.Г. Власова (д.б.н.,
профессор, научный редактор), А.В. Величко (к.м.н., доцент),
И.В. Веялкин (к.б.н., доцент), Н.Н. Веялкина (к.б.н., отв.
секретарь), А.В. Воропаева (к.б.н., доцент), Д.И. Гавриленко
(к.м.н.), М.О. Досина (к.б.н., доцент), А.В. Жарикова (к.м.н.),
С.В. Зыблева (д.м.н., доцент), С.А. Игумнов (д.м.н., профессор),
А.В. Коротаев (к.м.н., доцент), А.Н. Лызиков (д.м.н., профессор),
А.В. Макарович (к.м.н., доцент), С.Б. Мельнов (д.б.н., профессор),
В.М. Мицура (д.м.н., доцент), Я.Л. Навменова (к.м.н.,
доцент), Э.А. Надыров (к.м.н., доцент), И.А. Новикова (д.м.н.,
профессор), Э.Н. Платошкин (к.м.н., доцент), Э.А. Повелица
(к.м.н.), А.С. Подгорная (к.м.н.), Ю.И. Рожко (к.м.н., доцент),
И.П. Ромашевская (к.м.н.), А.П. Саливончик (к.б.н.), А.Е. Силин
(к.б.н., доцент), А.Н. Стожаров (д.б.н., профессор), И.О. Стома
(д.м.н., профессор), Н.И. Шевченко (к.б.н., доцент), Ю.И. Ярец
(к.м.н., доцент)

Редакционный совет

А.В. Аклеев (д.м.н., профессор, Челябинск), О.В. Алешикова
(д.м.н., чл.-кор. НАН РБ, Минск), С.С. Алексанин (д.м.н.,
профессор, Санкт-Петербург), Е.Л. Богдан (Минск),
Л.А. Бокерия (д.м.н., академик РАН и РАМН, Москва),
А.Ю. Бушманов (д.м.н., профессор, Москва), И.И. Дедов (д.м.н.,
академик РАМН, Москва), В.И. Жарко (Минск), К.В. Котенко
(д.м.н., профессор, Москва), В.Ю. Кравцов (д.б.н., профессор,
Санкт-Петербург), Н.Г. Кручинский (д.м.н., профессор, Пинск),
Т.В. Мохорт (д.м.н., профессор, Минск), Д.А. Пиневич (Минск),
В.Ю. Рыбников (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), А.А. Усс
(д.м.н., профессор, Минск), В.А. Филонюк (д.м.н., профессор,
Минск), Р.А. Часнойть (к.э.н., Минск), В.Д. Шило (Минск)

Технический редактор

С.Н. Никонович

Корректор

Н.Н. Юрченко

Адрес редакции 246040 г. Гомель, ул. Ильича, д. 290,
ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ», редакция журнала
тел (0232) 38-95-00, факс (0232) 37-80-97
<http://www.mbp.rcrm.by> e-mail: mbp@rcrm.by

© Государственное учреждение
«Республиканский научно-практический центр
радиационной медицины и экологии человека», 2025

№ 1(33)

2025

Medical and Biological Problems of Life Activity

Scientific and Practical Journal

Founder

Republican Research Centre
for Radiation Medicine
and Human Ecology

Journal registration
by the Ministry of information
of Republic of Belarus

Certificate № 762 of 6.11.2009

© Republican Research Centre
for Radiation Medicine
and Human Ecology

ISSN 2074-2088

Обзоры и проблемные статьи**Е.Л. Боровиков, А.М. Дзядзько**

Особенности анестезиологического обеспечения и периоперационного ведения пациентов при адреналэктомиях по поводу феохромоцитомы (обзор литературы)

5

О.Г. Жариков, А.А. Литвин, А.В. Жарикова

Реалии и перспективы развития искусственного интеллекта в медицине

15

О.В. Мурашко, А.С. Подгорная, А.Ю. Захарко

Лечение и профилактика дисфункции тазового дна (обзор литературы)

22

М.В. Линков, Ж.М. Козич, Н.Н. Усова

Парапротеинемические полиневропатии у пациентов с плазмоклеточными новообразованиями

29

О.П. Логинова, Н.И. Шевченко, Е.Л. Гасич

Факторы и причины развития рака шейки матки (обзор литературы)

38

Медико-биологические проблемы**К.Н. Буздалькин, Е.К. Нилова**

Оценка объёмной активности приземного слоя атмосферы *in situ*

47

И.В. Веялкин, В.А. Рожко, С.Н. Никонovich, О.И. Зубец, В.Б. Масыкин, В.Н. Бортовский

Анализ динамик заболеваемости злокачественными новообразованиями в Республике Беларусь до и после катастрофы на ЧАЭС

55

М.А. Корнеева, И.А. Семёник, А.О. Чеботарь, С.Н. Рябцева, С.А. Гузов

Характер воспалительной реакции в лёгочной паренхиме пациентов с разным клиническим течением COVID-19

66

Reviews and problem articles**E.L. Borovikov, A.M. Dzyadzko**

The features of anesthetic management and perioperative care of patients undergoing adrenalectomy for pheochromocytoma (literature review)

O.G. Zharikov, A.A. Litvin, A.V. Zharikova

Realities and prospects of development an artificial intelligence in medicine

O.V. Murashko, A.S. Podgornaya, A.Yu. Zakharko

Prevention and treatment of pelvic floor dysfunction (literature review)

M.V. Linkou, Zh.M. Kozich, N.N. Usova

Paraproteinemic polyneuropathies in patients with plasma cell neoplasms

O.P. Lohinava, N.I. Shevchenko, E.L. Gasich

Factors and causes of cervical cancer (literature review)

Medical-biological problems**K.N. Buzdalkin, E.K. Nilova**

In situ estimation of the air volumetric activity

I.V. Veyalkin, V.A. Rozhko, S.N. Nikonovich, O.I. Zubets, V.B. Masyakin, V.N. Bortnovsky

Analysis of the dynamics of the incidence of malignant neoplasms in the Republic of Belarus before and after the Chernobyl disaster

M.A. Korneeva, I.A. Siamionik, A.O. Chabatar, S.N. Rjabtseva, S.A. Guзов

Character of inflammatory response in pulmonary parenchyma of patients with different clinical courses of COVID-19

С.П. Новицкая, Е.А. Щурова, Н.В. Чуешова, В.М. Щемелев

Содержание провоспалительных цитокинов в ткани тимуса мышей в условиях хронического воздействия электромагнитного поля низкой интенсивности 73

В.И. Сильвистрович, А.А. Лызиков, Ю.И. Ярец

Доклинический этап испытания новых раневых покрытий в эксперименте на животных: динамика раневого заживления и уровни факторов роста 79

S.P. Navitskaya, E.A. Shchurova, N.V. Chueshova, V.M. Schemelev

Content of pro-inflammatory cytokines in mice thymus tissue under conditions of chronic exposure to low-intensity electromagnetic field

V.I. Silvistrovich, A.A. Lyzikov, Yu.I. Yarets

Preclinical stage of testing new wound dressings in an animal experiment: dynamics of wound healing and the levels of growth factors

Клиническая медицина

К.В. Левченко, В.М. Мицура

Прогнозирование летального исхода у пациентов с пневмонией, вызванной карбапенемрезистентной *Klebsiella pneumoniae* 89

Н.В. Матиевская, П.И. Абянова, Ю.П. Красько

Гастроинтестинальные проявления и детекция РНК SARS-CoV-2 в ректальном мазке у детей с инфекцией COVID-19 95

K.V. Levchenko, V.M. Mitsura

Prediction of fatal outcome in patients with pneumonia caused by carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae*

N.V. Mاتيyeuskaya, P.I. Abianova, Y.P. Krasko

Gastrointestinal manifestations and detection of SARS-CoV-2 rna in rectal swab in children with COVID-19

Обмен опытом

А.В. Доманцевич, В.А. Доманцевич, С.В. Шиманец

Случай двустороннего нетравматического заднего переломовывиха головок плечевых костей 101

A.V. Domantsevich, V.A. Domantsevich, S.V. Shimanets

Case of bilateral non-traumatic posterior fracture-dislocation of humeral heads

ОЦЕНКА ОБЪЁМНОЙ АКТИВНОСТИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ *IN SITU*

¹ГУ «РНПЦ радиационной медицины и экологии человека», Гомель, Беларусь;

²ГНТУ «Центр по ядерной и радиационной безопасности», Минск, Беларусь

Предложен метод, позволяющий оперативно оценить *in situ* объёмную активность приземного слоя атмосферы с приемлемой неопределённостью. Новый метод исключает необходимость отбора проб и выхода персонала из автомобиля. Появляется возможность оперативно уточнить результаты измерений, более детально изучить участок территории, на которой выявлен высокий градиент. Оценка объёмной активности приземного слоя атмосферы проводится по «чистым» площадям фотопиков полного поглощения и с использованием оригинальной калибровки блоков детектирования гамма-излучения. Минимальная детектируемая активность зависит от состава радионуклидов в аварийном выбросе, продолжительности набора спектра и не превышает $1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$, что значительно ниже установленных уровней вмешательства. Неопределённость предложенного метода экспресс-оценки оценивается в 30% при 95% доверительном интервале.

Ключевые слова: объёмная активность, воздух, приземный слой атмосферы, гамма-спектрометр, *in situ*

Введение

Традиционные методы измерений не позволяют оценить в полевых условиях (*in situ*) объёмную активность приземного слоя атмосферы в острую фазу радиологической аварии ($\text{Бк} \cdot \text{м}^{-3}$) [1]. Программное обеспечение, предназначенное для расчётов активности источников в полевых условиях, поставляется с γ -спектрометрами опционально и в условиях торгово-экономических санкций недоступно. Кроме того, область его применения ограничена. В лучшем случае на месте проводятся измерения мощности дозы γ -излучения, плотности потока α - и β -частиц, скорости счёта импульсов γ -излучения в фотопиках полного поглощения и фиксируется состав γ -излучающих радионуклидов.

К основным недостаткам существующих полевых методов измерений объёмной активности приземного слоя атмосферы относится необходимость отбора проб аэрозолей с последующей спектрометрией фильтров [2]. В полевых условиях

γ -спектрометрическим методом установить активность, осаждённую на фильтре, возможно только в узком диапазоне уровней загрязнения приземного слоя атмосферы, так как при низких или высоких уровнях загрязнения соотношение полезного сигнала к фону, соответственно, от природных источников и окружающей атмосферы, не позволяет получить результат с приемлемой неопределённостью. Установить в кузов автомобиля надёжную свинцовую защиту для детектора проблематично. Кроме того, при нахождении мобильной лаборатории радиационного контроля (МЛРК) в радиоактивном облаке не представляется возможным обеспечить достаточную герметичность отсека, в котором проводятся измерения.

Поэтому фильтры с отобранными пробами аэрозолей необходимо доставлять в стационарную лабораторию, где и проводятся измерения. Результаты лабораторных испытаний отобранных проб доступны спустя несколько часов или суток после доставки, подготовки проб к анализу и выполнения измерений.

Цель исследования — разработать метод для оперативной оценки *in-situ* объёмной активности приземного слоя атмосферы.

Материал и методы исследования

Объектами исследования являлись гамма-спектры и результаты γ -спектрометрических измерений активности эталонных источников. Методы исследования — γ -спектрометрический и математическое моделирование.

В исследованиях применялась мобильная лаборатория на базе автомобиля, укомплектованная двумя боковыми сцинтилляционными NaI(Tl) спектрометрами с размерами кристалла 7,62×7,62 см и одним передним LaBr₃(Ce) спектрометром с размером кристалла 2,54×2,54 см, помещёнными в свинцовые коллиматоры толщиной 5 см, а также переносным γ -спектрометром высокого разрешения с полупроводниковым (HrGe) детектором.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых исследований предложен подход, позволяющий исключить указанный выше недостаток традиционного метода измерения объёмной активности приземного слоя атмосферы. Ниже приводится описание метода и последовательность калибровки блоков детектирования для оценки *in situ* уровней загрязнения приземного слоя атмосферы различными γ -излучающими радионуклидами с точностью, вполне приемлемой для поставленных целей. Достоверность оценки средних значений при использовании предлагаемого метода выше в случае кратковременных аварийных выбросов, так как исключаются эффекты, приводящие к значительной дисперсии результатов анализа отобранных аэрозолей.

Приземный слой атмосферы можно представить в виде точечных источников активностью $A_v \cdot dV$, равномерно распределённых по бесконечному полупространству. Угловое распределение потока фотонов от точечного источника dF изотропно и с учётом рассеяния в воздухе обратно

пропорционально квадрату расстояния r до источника:

$$dF = \frac{\eta_e \cdot A_v}{r^2} \cdot e^{-\mu_a(E) \cdot r} \cdot dV, \quad (1)$$

где A_v — объёмная активность радионуклида, Бк·м⁻³;

η_e — квантовый выход при рассматриваемой энергии;

$\mu_a(E)$ — линейный коэффициент ослабления в воздухе, м⁻¹.

Чтобы получить поток частиц от приземного слоя атмосферы, окружающего переносной блок детектирования или МЛРК, необходимо проинтегрировать (1) по объёму загрязнённого радионуклидами воздуха (полупространству):

$$F = \iiint_{000}^{\infty\pi\pi} F(r) dr d\theta d\varphi = 2\pi \cdot \frac{\eta_e \cdot A_v}{\mu_a}, \quad (2)$$

Из (2) следует, что объёмная активность воздуха равна

$$A_v = \frac{\mu_a \cdot F}{2\pi \cdot \eta_e}, \quad (3)$$

С другой стороны, поток F пропорционален скорости счета в фотопике полного поглощения:

$$F = \frac{N}{\varepsilon \cdot T}, \quad (4)$$

где N — «чистая» площадь фотопика полного поглощения (интеграл в границах фотопика, из которого вычтено значение «постамента» от рассеянных фотонов, т.е. площади трапеции, над которой расположен фотопик);

T — «живое» время набора спектра, с;

ε — эффективность регистрации блока детектирования при заданной энергии (количество импульсов на попадающий в детектор фотон, всегда <1).

Подставляя выражение для потока (4) в (3), получим расчётную формулу для оценки объёмной активности приземного слоя атмосферы:

$$A_v = \frac{\mu_a \cdot N}{2\pi \cdot \eta_e \cdot \varepsilon \cdot T}, \quad (5)$$

Выражение (5) включает в себя геометрический фактор для оценки *in situ* объёмной активности приземного слоя атмосферы.

ёмной активности приземного слоя атмосферы $g_a(E)$, зависящий от энергии фотона:

$$g_a(E) = \frac{2\pi}{\mu_a}, \quad (6)$$

Поэтому иногда геометрию приземного слоя атмосферы называют 2π -геометрией, чтобы подчеркнуть её отличие от 4π -геометрии при проведении измерений с использованием блоков детектирования, установленных на борту летательных аппаратов, или, например, применении жидких сцинтилляторов при испытании растворов. Геометрия точечного источника, как уже отмечалось выше, равна:

$$g_p(E, r) = \frac{1}{2} \cdot r^{-2} \cdot e^{-\mu_a(E) \cdot r}, \quad (7)$$

Так как эффективность ε выше определена как количество импульсов на попадающий в детектор фотон, то в формулу (7) введён множитель $\frac{1}{2}$. Например, только около половины фотонов, испускаемых точечным источником, попадают в детектор при стандартной калибровке по эффективности регистрации, т.е. когда эталонный «точечный» источник прижимают к корпусу кристалла блока детектирования. В комплектацию блоков детектирования в цифровом виде обычно входят регрессионные полиномиальные зависимости эффективности регистрации от энергии. Как правило, указанные калибровки соответствуют расположению эталонных источников γ -излучения вплотную к корпусу кристалла блока детектирования.

Так как активность любого источника A , Бк, в γ -спектрометрии рассчитывается с использованием геометрического фактора g по формуле

$$A = \frac{N}{g \cdot \eta_e \cdot \varepsilon \cdot T}, \quad (8)$$

то, при известных значениях активности источника A_i и его геометрического фактора g_i , можно использовать их для оценки эффективности регистрации ε , т.е. при калибровке блока детектирования по эффективности регистрации. Поэтому для проведения экспресс-оценки *in situ* объёмной

активности приземного слоя атмосферы предлагается следующая процедура калибровки блока детектирования.

Как уже отмечалось выше, поставляемые изготовителем блока детектирования калибровки обычно соответствуют расположению эталонных источников гамма-излучения вплотную к корпусу кристалла блока детектирования. Однако в общем случае для того, чтобы использовать их в расчётах, необходимо внести поправку на размер и футляр эталонных источников, а также на расположение блока детектирования относительно эталонного источника при «заводской» калибровке. Например, изготовители МЛРК калибровали несъёмные бортовые блоки детектирования, прижимая источник к кузову автомобиля снаружи по оси кристалла.

Для этого предлагается ввести поправочный коэффициент k , компенсирующий неучтённое поглощение фотонов при калибровке поставщиком:

$$\varepsilon \approx \frac{\varepsilon_0}{k}, \quad (9)$$

где ε_0 — эффективность регистрации блока детектирования при заданной энергии, заявленная изготовителем МЛРК или блока детектирования.

Подставляя (6) и (9) в (8), получим формулу для экспресс-оценки *in situ* объёмной активности приземного слоя атмосферы, Бк·м³:

$$A_a = \frac{\mu_a}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{k}{\varepsilon_0} \cdot \frac{N}{\eta_e \cdot T}, \quad (10)$$

Чтобы гармонизировать предложенный коэффициент k с поправками, ранее введёнными для оценки *in situ* активности удалённых источников γ -излучения [3], необходимо представить его в безразмерном виде, вводя диаметр детектора, d , м:

$$A_a = \frac{\mu_a}{2 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{k_1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{N}{\eta_e \cdot T}, \quad (11)$$

Тогда можно применять единую процедуру калибровки блока детектирования — как для экспресс-оценки *in situ* активности удалённых источников γ -излучения [3], так

и объёмной активности приземного слоя атмосферы. Напомним, что в первом случае предлагалось вводить два поправочных безразмерных коэффициента k_1 и k_2 , при которых выражение для расчёта активности источника принимало вид:

$$A_s = \frac{(r + k_2 \cdot d)^2}{d^2} \cdot \frac{k_1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{N}{\eta_e \cdot T} \cdot \exp(\mu_a \cdot r + \mu_h \cdot r_h), \quad (12)$$

где $\mu_h(E)$ — линейный коэффициент ослабления в материале стенки контейнера источника, м^{-1} ;

r_h — толщина стенки контейнера, м.

Для определения значений k_1 и k_2 была разработана специальная калибровочная процедура, в которой можно применять только один эталонный «точечный» источник, но на двух различных расстояниях от детектора [3]. Расчёт k_1 проводился по аппаратурным линиям двух спектров каждого блока детектирования. Формула для расчёта k_1 получена путём решения системы из двух уравнений вида (12) (индексы 1 и 2 введены для первого и второго спектра):

$$k_1 = \frac{A_2 \cdot T_2 \cdot \varepsilon_1(E)}{N_2 \cdot \exp(\mu_a(E) \cdot r_2 + \mu_{h2}(E) \cdot r_{h2})} \cdot \left(\frac{d \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{A_1 \cdot T_1 \cdot N_2 \cdot \exp(\mu_a(E) \cdot r_2 + \mu_{h2}(E) \cdot r_{h2})}{A_2 \cdot T_2 \cdot N_1 \cdot \exp(\mu_a(E) \cdot r_1 + \mu_{h1}(E) \cdot r_{h1})}} \right)}{r_2 - r_1} \right)^2, \quad (13)$$

Например, при определении k_1 и k_2 для переносного полупроводникового блока детектирования использовались спектры от эталонных источников, расположенных коаксиально на расстояниях 0 м и 2 м от крышки корпуса кристалла. Для формирования первого спектра применялся прижатый вплотную фильтр диаметром 10 см из нетканого полимерного материала с нанесённой «точечной» активностью ^{137}Cs 1721 Бк. Второй спектр набран от «точечного» источника ^{137}Cs с активностью 180,2 кБк, отнесённого по оси детектора на расстояние 2 м. Диаметр полупроводникового кристалла — 6,15 см, а заявленная эффективность регистрации на линии 661,7 кэВ ^{137}Cs — 0,013. Линейный коэф-

фициент ослабления в воздухе при энергии фотонов 661,7 кэВ $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, квантовый выход на указанной линии ^{137}Cs — 0,8510. Результаты расчётов поправочного коэффициента k_1 по формуле (13) для переносного полупроводникового блока детектирования (HrGe) приведены в таблице 1.

В случае использования коллиматора полученную по формуле (11) активность воздуха следует разделить на безразмерную величину, равную доле полупространства, которую «открывает» данный коллиматор. Так, в случае нахождения применяемой МЛРК в облаке и при измерениях бортовыми блоками детектирования с коллиматорами, геометрия источника гамма-излучения примерно соответствует равномерно загрязнённой бесконечной четверти пространства.

Так как расчётная формула (11) получена «теоретическим» путём, представляется целесообразным в случае возникновения аварийной ситуации с выбросом радиоактивных веществ сравнить расчётную величину и результат оценки активности приземного слоя атмосферы традиционным методом — путём осаждения радиоактивных аэрозолей на фильтры и проведением γ -спектрометрии проб в лабораторных условиях.

Однако предлагаемый метод экспресс-оценки косвенно был апробирован на территории чернобыльских выпадений и в зоне воздействия радиационно-опасного объекта. В первом случае поток γ -квантов ^{137}Cs (662 кэВ) в основном от загрязнённой почвы регистрировался бортовыми сцинтилляционными блоками детектирования, расположенными в коллиматорах. Установлено, что в отдалённый поставарийный период почва, загрязнённая данным радиоизотопом с плотностью 2 Ки·км², на рабочей поверхности детектора создаёт поток эквивалентный потоку от окружающего

Таблица 1 — Результаты расчёта поправочного коэффициента

r = 0 см		r = 2 м		k ₁
N	T, сек	N	T, сек	
179662	10209	2935	2203	0,34

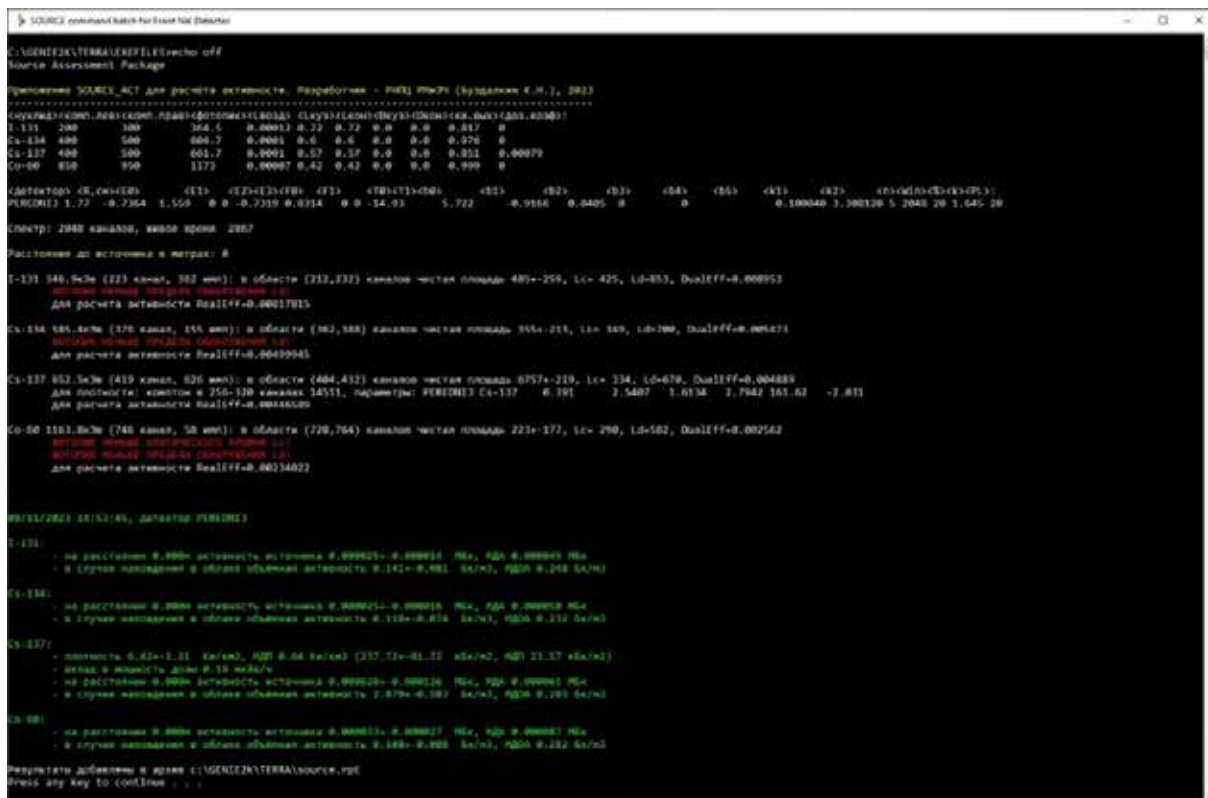


Рисунок 1 — Экспресс-оценка параметров радиационной обстановки на территории пункта захоронения отходов дезактивации (детектор — $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$)

воздуха с гипотетической объёмной активностью $1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ (рисунок 1). Указанная линия гамма-спектра соответствовала минимальной детектируемой объёмной активности $0,3 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$, алгоритм расчёта которой приведён ниже.

Во втором случае регистрировался поток фотонов с энергией 363 кэВ , испускаемых при β -распаде ^{131}I . Полупроводниковый (HrGe) блок детектирования высокого разрешения был установлен вне кузова МЛРК без коллиматора на территории учреждения здравоохранения «Минский городской клинический онкологический центр». Установлено, что разработанное программное обеспечение позволяет регистрировать уровни загрязнения приземного слоя атмосферы ^{131}I до $0,2 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$, что также значительно ниже аварийных уровней вмешательства (рисунок 2). Поток γ -квантов приблизительно соответствовал хранимому запасу радиопрепаратов с учётом расстояния и установленной биологической защиты. Таким образом, подтверждены теоретическая оценка минимальной детек-

тируемой объёмной активности и возможность использования программно-аппаратного комплекса для оценки объёмной активности радиоактивного облака в острую фазу радиологической аварии.

Как свидетельствуют рисунки, для обеспечения оперативности получения результатов все расчёты предлагаемым методом были автоматизированы путём разработки специального программного обеспечения. В программном обеспечении при обработке γ -спектров для определения значения «постамент» от рассеянных фотонов (т.н. континуума) используется линейное приближение трапецией, площадь которой равна произведению полусуммы оснований на высоту:

$$B = \left(\frac{S}{2 \cdot n} \right) \cdot (B_1 + B_2), \quad (14)$$

где S — ширина области пика (т.н. Region Of Interest) в каналах;

B — площадь комптоновского континуума под пиком;

n — количество каналов, по которым проводится усреднение на границах;

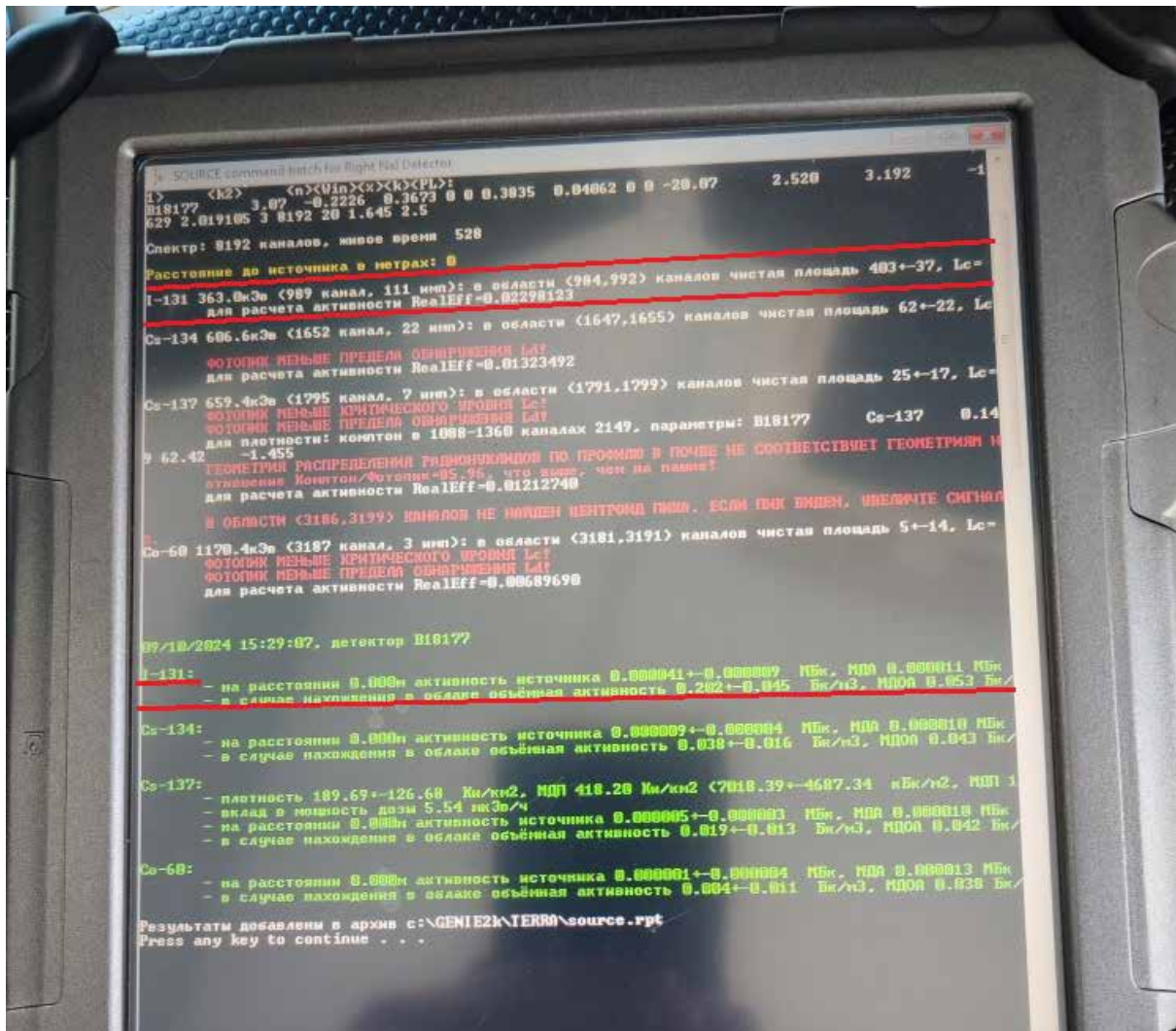


Рисунок 2 — Расчет активности ^{131}I по аппаратурной линии полупроводникового блока детектирования Canberra Falcone 5000 на территории онкологического центра

B_1 и B_2 — интегралы по областям указанного усреднения слева и справа от пика.

Так как G (полный интеграл под пиком) и B описываются распределением Пуассона, то формула для расчёта стандартного отклонения «чистой» площади пика полного поглощения σ_N при доверительном интервале в 1 сигму ($p=0,682$) может быть представлена следующим образом [4]:

$$\sigma_N = \sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_B^2} = \sqrt{G + \left(\frac{S}{2 \cdot n}\right)^2 \cdot (B_1 + B_2)}, \quad (15)$$

Неопределённость оценки «чистой» площади пика полного поглощения используется при оценках результирующей неопределённости вычисления объёмной активности воздуха σ_a (11) и минимальной детектируемой объёмной активности:

$$\sigma_a = A_a \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2}, \quad (16)$$

где σ_ε — неопределённость калибровки по эффективности регистрации ε .

Неопределённости определения квантового выхода и оценки «живого» времени набора спектра принимаются равными 0. Так как неопределённость расчёта эффективности регистрации в 20% установлена по результатам независимой экспертизы [3], то результирующая неопределённость при оценке объёмной активности воздуха равна

$$\sigma = A_a \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + 0,04}.$$

С учётом неопределённости активности поставляемых эталонных источников сум-

марная неопределённость предложенного метода оценки оценивается в 30 процентов.

В разработанном программном обеспечении расчёт минимальной допустимой объёмной активности (далее — МДОА) и её неопределённости основан на принятых в спектрометрии тестах т.н. критического уровня (Critical Level Test) и предела детектирования (Detection Limit) [4]. Если проверку по критическому уровню не выполнять, то все пики, независимо от их размера и формы, будут приниматься как действительные. В том числе и с отрицательной «чистой площадью». Предел детектирования определяет нижний предел обнаружения для данной ситуации измерения. При применении указанных тестов расчёт минимальной детектируемой объёмной активности приземного слоя атмосферы можно проводить по формуле:

$$\text{МДОА} = \frac{\mu_a \cdot k_1 \cdot \Omega \cdot \left(\Omega + 2 \cdot \sqrt{B + \left(\frac{S}{2 \cdot n} \right)^2 \cdot (B_1 + B_2)} \right)}{2 \cdot \eta_i \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot T},$$

где при $\Omega=1,645$ достигается 95% доверительный интервал оценки минимальной детектируемой объёмной активности приземного слоя атмосферы. Значение 1,645 является абсциссой нормального распределения, соответствующей вероятности 95 процентов. В γ -спектроскопии сигналы подсчитываются многоканальным анализатором и могут быть описаны распределением Пуассона, если игнорировать любые систематические эффекты. Если число зарегистрированных фотонов достаточно велико, распределение Пуассона может быть аппроксимировано гауссовым распределением.

Заключение

Предложен метод, позволяющий оперативно оценить *in situ* объёмную активность приземного слоя атмосферы с приземной неопределённостью. Новый метод исключает необходимость отбора проб

и выхода персонала из автомобиля. Кроме того, появляется возможность оперативно уточнить результаты измерений, более детально изучить участок территории, на которой выявлен высокий градиент.

Оценка объёмной активности приземного слоя атмосферы проводится по «чистым» площадям фотопиков полного поглощения и с использованием оригинальной калибровки блоков детектирования γ -излучения. В том числе может проводиться расчёт объёмной активности воздуха $^{134}, ^{137}\text{Cs}$, ^{60}Co , ^{131}I . Минимальная детектируемая активность зависит от состава радионуклидов в аварийном выбросе, продолжительности набора спектра и не превышает $1 \text{ Бк} \cdot \text{м}^3$, что значительно ниже установленных уровней вмешательства. Неопределённость предложенного метода экспресс-оценки оценивается в 30% при 95% доверительном интервале.

Новый метод позволяет выполнять измерения в соответствии с международно признанными подходами [1]. Метод предназначен для использования специалистами в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности и эксплуатирующими мобильную лабораторию радиационного контроля при проведении экспресс-оценки радиационной обстановки.

Библиографический указатель

1. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency / International atomic energy agency IAEA-TECDOC-1092. – Vienna, 1999. – 305 p.
2. Нилова, Е.К. Методология экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории / Е.К. Нилова, К.Н. Буздалкин // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – № 2(32). – 2024. – С.65-72.
3. Нилова, Е.К. Оценка активности удалённых источников гамма-излучения / Е.К. Нилова, К.Н. Буздалкин, В.Л. Самсонов // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – № 1(31). – 2024. – С.55-61.
4. Genie™ 2000 Spectroscopy Software. Customization Tools. 9233653J V3.4 / Canberra Industries, Meriden, USA. – 2013. – 571 p.

K.N. Buzdalkin, E.K. Nilova

IN SITU ESTIMATION OF THE AIR VOLUMETRIC ACTIVITY

The proposed method allows to quickly estimate *in-situ* the air volumetric activity with acceptable uncertainty. The new method eliminates the need for sampling and personnel exiting the vehicle. It becomes possible to quickly double-check the measurement results and study in more detail the area of the territory where a high gradient has been detected. The volumetric activity of the atmospheric surface layer is estimated based on the «clean» areas of the photopeaks of total absorption and using the original calibration of spectrometer. The minimum detectable activity depends on the composition of the radionuclides in the emergency release, the duration of the spectrum acquisition, and does not exceed $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, which is significantly lower than the established intervention levels. The uncertainty of the proposed in situ assessment method is estimated at 30% with a 95% confidence interval.

Key words: *volumetric activity, air, surface layer of the atmosphere, gamma-ray spectrometer, in situ*

Поступила 06.02.25