

Медико-биологические проблемы жизнедеятельности

Научно-практический рецензируемый журнал

№ 2(30)

2023 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 25.09.23
Формат 60×90/8. Бумага мелованная.
Гарнитура «Times New Roman».
Печать цифровая. Тираж 120 экз.
Усл. печ. л. 15,5. Уч.-изд. л. 9,54.
Зак. 556.

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. Веякин (к.б.н., доцент), 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 (к.м.н., доцент, отв. секретарь), С.А. Игумнов (д.м.н., профессор), А.В. Коротаяев (к.м.н., доцент), Д.В. Кравченко (к.м.н.), А.Н. Лызинов (д.м.н., профессор), А.В. Макарич (к.м.н., доцент), С.Б. Мельнов (д.б.н., профессор), В.М. Мишура (д.м.н., доцент), Я.Л. Навменова (к.м.н., доцент), Э.А. Надьров (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.), М.Г. Русаленко (к.м.н., доцент), А.П. Саивончик (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. Алейникова (д.м.н., чл.-кор. НАН РБ, Минск), С.С. Алексанин (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), Д.А. Базыка (д.м.н., профессор, Киев), А.П. Бирюков (д.м.н., профессор, Москва), 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), М.П. Захарченко (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), Л.А. Ильин (д.м.н., академик РАМН, Москва), К.В. Котенко (д.м.н., профессор, Москва), В.Ю. Кравцов (д.б.н., профессор, Санкт-Петербург), Е.Н. Кроткова (к.м.н., доцент, Минск), Н.Г. Кручинский (д.м.н., профессор, Пинск), Т.В. Мохорт (д.м.н., профессор, Минск), Д.Л. Пиневиц (МЗ РБ, Минск), В.Ю. Рыбников (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), Н.Д. Тронько (д.м.н., чл.-кор. НАН, акад. НАМН Украины, Киев), А.Л. 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

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», 2023

№ 2(30)

2023

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**Reviews and problem articles**

С.В. Зыблева, Ю.И. Рожко, А.В. Жарикова, Б.О. Кабешев, С.Л. Зыблев

S.V. Zybleva, Yu.I. Rozhko, A.V. Zharikova, B.O. Kabeshev, S.L. Zyblev

Роль N-ацетилцистеина в терапии заболеваний, характеризующихся окислительным стрессом (обзор литературы) 6

The role N-acetylcysteine (nac) in the therapy of diseases characterized by oxidative stress (literature review)

Медико-биологические проблемы**Medical-biological problems**

Н.Н. Веялкина, Л.А. Белая, О.С. Аксёненко, А.Е. Сусленкова, Е.А. Медведева

N.N. Veialkina, L.A. Belaia, O.S. Aksenenko, A.E. Suslenkova, E.A. Medvedeva

Влияние хронического рентгеновского облучения в малых дозах на грудной отдел в эксперименте 17

Effect of chronic X-ray irradiation in low doses on the thoracic region in an experiment

И.Е. Гурьянова, Е.А. Полякова, К. Суффритти, Л.Б. Коростелева, С.Н. Алешкевич, Ю.С. Жаранкова, М.В. Белевцев

I.E. Guryanova, E.A. Polyakova, C. Suffritti, L.B. Korosteleva, S.N. Aleshkevich, Y.S. Zharankova, M.V. Belevtsev

Клиническая эффективность применения метода по определению расщепленного высокомолекулярного кининогена в диагностике наследственного ангиоотека 23

Clinical efficiency of the cleaved high-molecular-weight kininogen detection in the diagnosis of hereditary angioedema

А.-М.В. Ерофеева, С.В. Пинчук, С.Н. Рябцева, А.Ю. Молчанова

A.-M. Yerofeyeva, S. Pinchuk, S. Rjabceva, A. Molchanova

Активация каннабиноидных рецепторов II типа как вариант потенцирования мезенхимальных стволовых клеток в модели периферической нейропатической боли 29

Activation of type II cannabinoid receptors as variant for mesenchymal stem cell potentiation in a model of peripheral neuropathic pain

Я.И. Исайкина, В.В. Солодовникова, Р.Л. Фролова, Ю.В. Савич, А.А. Жерносеченко, Е.М. Скрыгина

Y. Isaikina, V. Solodovnikova, R. Frolova, U. Savich, H. Zhernasechanka, A. Skrahina

Мезенхимальные стволовые клетки из костного мозга пациентов с лекарственно-устойчивым туберкулезом для применения в клеточной терапии 40

Mesenchymal stem cells from bone marrow of patients with drug-resistant tuberculosis for cellular therapy

М.В. Кадука, Т.А. Бекяшева, С.А. Иванов, В.В. Ступина

M.V. Kaduka, T.A. Bekjasheva, S.A. Ivanov, V.V. Stupina

Содержание изотопов урана в некоторых видах пищевых продуктов. Оптимизация метода определения 46

Uranium isotopes content in the certain types of foodstuffs. Optimization of the analytical method

Е.К. Нилова, К.Н. Буздалкин		E.K. Nilova, K.N. Buzdalkin	
Геометрический фактор для оценки плотности загрязнения почвы <i>in-situ</i>	54	Geometry factor for <i>in-situ</i> soil contamination density estimation	
А.М. Островский, И.Н. Коляда		A.M. Ostrovsky, I.N. Kolyada	
Анализ смертности населения Гомельской области от инфекционных и паразитарных болезней в 2009-2019 гг.	62	Mortality analysis of the Gomel region population from infectious and parasitic diseases in 2009-2019	
Н.В. Поклонская, Ю.А. Шилова, Т.В. Амвросьева		N.V. Paklonskaya, Yu.A. Shilova, T.V. Amvrosieva	
Метод мультиплексной полимеразной цепной реакции для диагностики вирусной кишечной инфекции неуточненной	69	Multiplex polymerase chain reaction method for the diagnosis of unspecified viral acute gastroenteritis	
Клиническая медицина		Clinical medicine	
Л.И. Данилова, В.А. Рожко, И.В. Веялкин, И.Г. Савастеева, С.Н. Никонович, Т.М. Шаршакова		L.I. Danilova, V.A. Rozhko, I.V. Veyalkin, I.G. Savasteeva, S.N. Nikonovich, T.M. Sharshakova	
Клинико-лабораторные особенности аутоиммунного тиреоидита у субъектов когорты по результатам скрининга	74	Clinical and laboratory features of autoimmune thyroiditis in subjects of the cohort according to the results of screening	
А.Ю. Захарко, А.С. Подгорная, О.В. Мурашко, Т.В. Статкевич, А.Р. Ромбальская		A.Yu. Zaharko, A.S. Podgornaya, O.V. Murashko, T.V. Statkevich, A.R. Rombalskaya	
Течение беременности, родов, состояние фетоплацентарного комплекса у женщин с абдоминальным ожирением и гипертензивными расстройствами	88	Course of pregnancy, delivery, the state of the fetoplacental complex in women with abdominal obesity and hypertensive disorders	
В.В. Крюков		V.V. Kryukov	
Состояние когнитивной сферы участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС	95	The state of the cognitions of clean-up workers of the consequences of the Chernobyl accident	
Д.М. Лось, В.С. Волчек		D. Los', V. Volchek	
Оценка осведомленности женского населения Гомельской области о профилактике и ранней диагностике рака молочной железы	106	Assessment of awareness of the female population of Gomel region about prevention and early diagnosis of breast cancer	
Н.А. Песковая, А.В. Солнцева		N.A. Peskavaya, A.V. Solntsava	
Факторы снижения минеральной плотности костной ткани у детей с синдромом Шерешевского-Тернера	111	Factors of reduced bone mineral density in children with Turner syndrome	

Обмен опытом**Experience exchange**

Н.А. Метляева, А.Ю. Бушманов, И.А. Галстян, В.Ю. Нугис, М.В. Кончаловский, О.В. Щербатых, Ф.С. Торубаров, Е.О. Нечаева, А.С. Кретов, В.В. Кореньков

Психофизиологическая оценка индивидуальных особенностей личности у двух пациентов с тяжелыми местными лучевыми поражениями кистей рук и острой лучевой болезнью I степени (30 лет наблюдения)

N.A. Metlyeva, A.Yu. Bushmanov, I.A. Galstyan, V.Yu. Nugis, M.V. Konchalovsky, O.V. Shcherbatykh, F.S. Torubarov, E.O. Nechaeva, A.S. Kretov, V.V. Korenkov

Psychophysiological Assessment of Individual Personality in Two Patients with Severe Local Radiation Injuries (LRI) of Hand and Acute Radiation Sickness (ARS) I Degree (30 Years of Follow-up)

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФАКТОР ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ *in-situ*

¹ГНТУ «Центр по ядерной и радиационной безопасности» МЧС Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь;

²ГУ «РНПЦ радиационной медицины и экологии человека», г. Гомель, Беларусь;

³УО «Гомельский государственный медицинский университет», г. Гомель, Беларусь

Предлагается метод оценки плотности загрязнения почвы гамма-излучающими радионуклидами ($\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}$) *in-situ* (в полевых условиях без отбора проб). Метод позволяет учесть особенности распределения радионуклидов по профилю почвы на данном участке по соотношению рассеянного и нерассеянного потоков фотонов. Расширена область применения и снижена неопределенность ранее разработанного метода, применявшегося при радиологическом обследовании сельскохозяйственных земель, загрязнённых ^{137}Cs , без отбора проб. Предложенный метод дистанционной оценки плотности загрязнения практически не вносит дополнительной ошибки по сравнению с традиционным способом, включающим отбор проб почвы и последующий их анализ в лабораторных условиях. Продолжительность набора спектра и его автоматической обработки при плотности загрязнения ^{137}Cs более $100 \text{ кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ не превышает 1 мин.

Ключевые слова: радионуклид, плотность загрязнения, гамма-спектрометр, *in-situ*

Введение

Для дозиметрических и радиоэкологических моделей основными исходными данными являются значения плотности загрязнения территории радионуклидами. После аварии на радиационно-опасном объекте и выпадений радионуклидов на почву проводится оперативное уточнение прогнозных значений плотности, полученных расчётным путём в острый период с помощью моделей переноса радиоактивной примеси в атмосфере [1, 2]. Плотность загрязнения принято уточнять путём отбора проб почвы с последующим их анализом в лабораторных условиях [3], затратным как по времени, так и по ресурсам.

В то же время в большинстве случаев основными дозоформирующими радионуклидами в выбросе являются гамма-излучатели, что позволяет использовать полевые (*in-situ*) методы экспресс-оценки плотности загрязнения территории практически с такой же точностью. Достоверность оценки среднего значения при этом

выше, так как смягчаются эффекты микро-рельефа почвы, приводящие к значительной дисперсии результатов анализа проб, отобранных буром.

Основная проблема, сдерживающая применение дистанционных методов оценки плотности загрязнения, заключается в необходимости учёта «геометрии» источника. В данном случае – распределения радионуклидов по профилю почвы, которое может изменяться со временем как в результате природных процессов вертикальной миграции в более глубокие горизонты, так и техногенных – при агротехнической обработке почвы, проведении защитных мероприятий, строительных работах и т.д. Заглубление радионуклидов может снижать поток фотонов, падающий на детектор с исходной энергией, в несколько раз.

В работе предлагается оригинальный метод автоматического расчёта геометрического фактора, позволяющего учесть особенности распределения радионуклидов по профилю почвы на данном участ-

ке территории. Метод основан на анализе линии гамма-спектра не только в областях фотопиков полного поглощения, но и областях, соответствующих комптоновскому рассеянию [4]. Прототипы оригинального метода и программного обеспечения успешно использовались при картировании обширных территорий радиоактивно-загрязнения ^{137}Cs Гомельской, Могилёвской и Брестской областей в 1987-1994 гг. Применяемая методика картирования и измерения плотности загрязнения гамма-излучающими радионуклидами в полевых условиях без отбора образцов грунта одобрена Межведомственной Комиссией по дозиметрическим измерениям при АН СССР (заседание № 40, 16 мая 1989 года, Институт атомной энергии (ИАЭ) имени Курчатова, г. Москва) [5].

Цель исследования – обеспечить возможность оценки плотности загрязнения почвы *in-situ* в полевых условиях без отбора проб.

Материал и методы исследования

Объектами исследования являлись гамма-спектры, набор которых выполнен на участках территории с различной геометрией источника. Метод исследования – гамма-спектрометрический.

В исследованиях применялась мобильная лаборатория Центра по ядерной и радиационной безопасности МЧС Республики Беларусь. Мобильная лаборатория укомплектована двумя боковыми сцинтилляционными NaI(Tl) спектрометрами с размерами кристалла $7,62 \times 7,62$ см и одним передним LaBr₃(Ce) спектрометром с размерами кристалла $2,54 \times 2,54$ см, помещенными в свинцовые коллиматоры толщиной 5 см, спектрометром высокого разрешения Falcon 5000 на основе детектора из особо чистого германия, а также программным обеспечением Genie 2000 и Falcon 5000 (Mirion Technologies).

Поставленное в составе мобильной лаборатории программное обеспечение Genie 2000 содержит набор программных средств для набора и обработки спектров

с многоканальных анализаторов. Штатное программное обеспечение реализует функции управления многоканальными анализаторами, отображения спектра и выполнения с ним ряда операций, базовые функции обработки спектра и создания отчетов.

Оборудование позволяло оценивать радиационную обстановку в единицах скорости счета, $\text{имп} \cdot \text{с}^{-1}$. Нормативные правовые акты Республики Беларусь, как и международные рекомендации, требуют результаты представлять, в частности, в значениях плотности загрязнения, $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$. Поэтому в ходе исследований решалась проблема адаптации функциональных характеристик и выходных параметров оборудования мобильной лаборатории для получения необходимых количественных характеристик ^{137}Cs черномыльского происхождения определялся путём радиологического обследования традиционным методом [3]. Измерение активности ^{137}Cs в пробах почвы проводилось гамма-спектрометрическим методом на радиометре «РКГ-АТ1320» (Атомтех, Минск, Беларусь) с использованием свинцовой защиты.

Результаты исследования

При расчёте активности источника гамма-излучения, в том числе плотности поверхностного загрязнения, принято использовать так называемый калибровочный фактор (коэффициент) c :

$$A_i = c_i \cdot \frac{(N_{i,0} - N_{i,p})}{T}, \quad (1)$$

где A_i – загрязнение объекта i -ым радионуклидом, Бк, $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ или $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$;

c_i – калибровочный фактор соответствующей размерности;

$N_{i,c}$ – интеграл в комптоновской области спектра, соответствующей энергии фотонов (гамма-линии) i -го радионуклида;

$N_{i,0}$ – «чистая» площадь анализируемого фотопика полного поглощения i -го радионуклида в спектре (здесь и далее под «чистой» площадью фотопика полного поглощения подразумевается значение интеграла в границах фотопика из кото-

рого вычтено значение «постамент», т.е. площади «трапеции», над которой расположен фотопик);

$N_{i,p}$ – аналогичная площадь фотопика в отсутствии исследуемого источника (фон);

T – «живое» (за вычетом времени на обработку сигналов) время набора спектра, с.

При *in-situ* измерениях уровней загрязнения радионуклидами территории значение $N_{i,0}$ в выражении (1) всегда равно нулю. Доаварийный уровень загрязнения объектов указанным радионуклидом априори неизвестен и при расчётах считается ничтожно малым.

В общем случае при оценке загрязнения объекта i -ым радионуклидом по одной гамма-линии калибровочный фактор c_i равен обратной величине произведения квантового выхода η_i , внутренней эффективности регистрации детектора $\varepsilon_i(E)$ при энергии указанных фотонов, а также геометрического фактора $g_i(E)$, который зависит от распределения i -го радионуклида в источнике, размера и формы источника, расположения его относительно детектора и рассеивающих свойств материалов и сред, расположенных в источнике и между источником и детектором [6]:

$$c_i = \frac{1}{\eta_i \cdot \varepsilon_i(E) \cdot g_i(E)}, \quad (2)$$

Для того, чтобы обеспечить возможность оценки плотности загрязнения почвы *in-situ* в полевых условиях без отбора проб, необходимо определить значение геометрического фактора $g_i(E)$, которое может варьировать на порядок в зависимости от глубины залегания и распределения радионуклидов по профилю почвы, плотности почвы. Учесть особенности распределения радионуклидов на данном участке территории можно с помощью анализа линии гамма-спектра не только в областях фотопиков полного поглощения, но и областях, соответствующих комптоновскому рассеянию.

В данной работе область применения ранее разработанного метода оценки плотности загрязнения [4, 5] расширена на

установленный состав гамма-излучающих радионуклидов. В отличие от территории чернобыльского загрязнения, где из гамма-излучающих радионуклидов практическое значение имеет только ^{137}Cs , при мониторинге территории в зоне воздействия атомных электростанций необходимо, согласно законодательству о ядерной и радиационной безопасности Республики Беларусь, оценивать плотность загрязнения штатными (и незапланированными) выбросами гамма-излучающих ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{60}Co . В случае аварийных выбросов радионуклидный состав может быть значительно шире.

В настоящей работе предлагается новое приближение калибровочного фактора (2) степенной функцией, которая в большей мере соответствует описываемому физическому процессу, в том числе при предельных значениях отношения интеграла в комптоновской области спектра к «чистой» площади фотопика полного поглощения (по сравнению с ранее используемым приближением полиномом второго порядка):

$$\sigma_i = c_i \cdot \frac{N_{i,0}}{T} = a_{i,1} \cdot \left(\frac{N_{i,c}}{N_{i,0}} \right)^{a_{i,2}} \cdot \frac{N_{i,0}}{T}, \quad (3)$$

где σ_i – плотность загрязнения участка территории i -ым радионуклидом, Ки·км² (для получения результата в кБк·м² величину в Ки·км² следует умножить на 37);

$a_{i,1}$ и $a_{i,2}$ – коэффициенты (значения параметров) регрессионных кривых, определяемые путем описанной ниже процедуре калибровки, размерность $a_{i,1}$ – Ки·км²·с;

$N_{i,c}$ – интеграл в комптоновской области спектра, соответствующей энергии фотонов (гамма-линии) i -го радионуклида.

Из уравнений (2) и (3) следует, что значение геометрического фактора $g_i(E)$, которое зависит только от глубины залегания и распределения радионуклидов по профилю почвы, плотности почвы, высоты расположения детектора относительно поверхности почвы и наличия защиты детектора, определяется выражением

$$g_i(E) = \frac{1}{a_{i,1} \cdot \eta_i \cdot \varepsilon_i(E)} \cdot \left(\frac{N_{i,0}}{N_{i,c}} \right)^{a_{i,2}}, \quad (4)$$

Однако на практике, как уже отмечалось выше, вместо геометрического фактора $g_i(E)$ (4) используется зависящий от него калибровочный фактор c_i (2) соответствующей размерности. Поэтому рекомендуется применять подход (3), позволяющий учесть абсолютную эффективность регистрации гамма-квантов, испускаемых i -ми радионуклидами, распределёнными по профилю почвы, в том числе внутреннюю эффективность детектора и эффективность по пику полного поглощения. Преимуществом метода является возможность автоматически учитывать изменение потоков гамма-квантов от всех техногенных гамма-излучающих радионуклидов в результате их рассеяния в верхнем слое почвы. Вкладом в аппаратную линию спектра природных радионуклидов уран-ториевого ряда в случае незапланированных и, тем более, аварийных выбросов можно пренебречь. При использовании указанного метода вносимая в результаты измерения дополнительная погрешность на порядок величины ниже погрешности оценки средней плотности загрязнения территории традиционным методом [3], связанным с отбором образцов почвы.

Для калибровки метода, т.е. определения значений коэффициентов регрессионного уравнения (3), необходимо выполнить анализ гамма-спектров, набранных на участках территории с различной геометрией источника (распределением радионуклидов по профилю почвы), и проанализировать линии гамма-спектра не только в областях фотопиков полного поглощения, но и областях, соответствующих комптоновскому рассеянию.

Для проверки предложенного подхода проведена калибровка как полупроводникового, так и сцинтилляционных детекторов, размещенных как в кузове автомобиля, так и на штативе на местности. Калибровка проводилась по ^{137}Cs , так как участков с достаточным загрязнением другими техногенными гамма-излучающими радионуклидами в настоящее время на территории Беларуси нет.

На расстоянии 65 км от Минска по трассе на Белорусскую АЭС выбраны пять референтных площадок с плотностью загрязнения ^{137}Cs от 37 до 555 $\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$ (от 1 до 15 $\text{Ки}\cdot\text{км}^{-2}$) и различным распределением радионуклидов по профилю почвы (лес, целина, луг естественный/улучшенный, пашня). При выборе площадок путём оценки величины отношения площади комптоновской области спектра к «чистой» площади пика полного поглощения 661кЭв (^{137}Cs) учитывалось совокупное влияние следующих факторов:

- проводились ли агротехнические мероприятия на участках после выпадений радионуклидов в 1986 году и какие именно (вспашка на глубину пахотного горизонта 20 см, поверхностное улучшение лугов или дискование на глубину 10 см);
- типы почв, от которых зависит глубина миграции радионуклидов на необработанных участках;
- плотность и влажность почвы.

Референтные площадки выбраны на расстоянии не более 500 м друг от друга, радиус реперных площадок не менее 30 м. С каждой площадки отобраны методом «конверта» [3] пять проб почвы. Каждая проба, в свою очередь, формировалась из пяти (в лесу и на целине) или четырёх (на пашне и лугу) кернов, отобранных буром-пробоотборником диаметром 40 мм на глубину пахотного горизонта 20 см. Уколы пробоотборником проводились с шагом 5 м.

В лабораторных условиях после взвешивания, сушки и перемешивания проб измерено удельное содержание ^{137}Cs , рассчитаны средняя по участку и дисперсия плотности загрязнения. Средняя плотность загрязнения i -ой площадки ^{137}Cs , установленная в результате радиологического обследования традиционным методом [3], σ_i , $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}$, рассчитывалась по формуле:

$$\sigma_i = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot n \cdot d^2} \cdot \bar{A}_i$$

где \bar{A}_i – средняя удельная активность ^{137}Cs в верхнем 20-ти сантиметровом слое почвы на i -ой референтной площадке, $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$,

m – полная масса исходной пробы почвы естественной влажности, кг,

n – количество уколов пробоотборником,

d – диаметр пробоотборника, м.

Установлено статистическое различие средней плотности высушенной почвы, отобранной на различных площадках. Типы почв варьируют от серой лесной до дерново-подзолистой (песчаной и суглинистой) и торфяной. Дисперсность выпадений наиболее выражена в лесах, где после выпадений радионуклидов в основном не нарушался верхний слой почвы: в лесах относительная погрешность с учётом стандартного отклонения выборочного среднего значения и систематической ошибки прибора – 39%, на пашке – 42%. На пашке погрешность составила 23%, на лугу с поверхностным улучшением – 29%, т.е. на регулярно обрабатываемых почвах ошибка оценки средней плотности загрязнения по 5 пробам в 2 раза ниже.

На выбранных референтных площадках выполнен набор и обработка гамма-спектров с использованием переносного полупроводникового и трёх бортовых сцинтилляционных блоков детектирования. Погрешности определения спектральных характеристик (интегралов области спектра, «чистых» площадей пиков полного поглощения и времени набора спектра) <1%, что значительно, на порядки, ниже погрешностей определения плотности загрязнения традиционным методом. Предложенный метод дистанционной оценки плотности загрязнения практически не вносит дополнительной ошибки. В то время как продолжительность набора спектра при указанных плотностях загрязнения и его автоматической обработки не превышает 1 мин.

Разрешение по энергии у всех четырёх детекторов ниже 6,3% на линии 662 кЭв (NaI(Tl) – 6,1% и 6,3%, LaBr₃ – 2,9%, BeGe – 0,15%), а эффективность регистрации при энергии 400кЭв превышает эффективность регистрации при 662 кЭв только на 30%. Поэтому область комптоновского рассеяния фотонов ¹³⁷Cs с исходной энергией 662 кЭв выбрана в диапазоне

400÷500 кЭв. Границы области выбраны таким образом, чтобы при наличии в выпадениях ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹⁴⁴Ce, ⁶⁰Co и других основных дозоформирующих (за пределами промплощадки аварийной АЭС) радионуклидов минимизировался их вклад в интеграл по указанной области спектра. Также нежелательно включение в расчёты области 511 кЭв, в том числе из-за влияния аннигиляции электрон-позитронных пар и космических лучей. Вариации содержания природного ⁴⁰K в почве (1460 кЭв) практически не влияют на отношение интеграла в комптоновской области к «чистой» площади фотопика ¹³⁷Cs.

Для определения значений коэффициентов нелинейной регрессии, аппроксимирующей зависимость калибровочного фактора c_i (1) для i -го радионуклида от отношения $N_{i,c}/N_{i,0}$

$$c_{i,j} = a_{i,j,1} \cdot \left(\frac{N_{i,j,c}}{N_{i,j,0}} \right)^{a_{i,j,2}} \quad (5)$$

использовались экспериментальные значения $c_{i,j,k}$, полученные на пяти площадках (введены индексы j – номер детектора в мобильной лаборатории, от 1 до 4, чтобы показать влияние типа детектора на значение калибровочного фактора, и номер референтной площадки $k=1...5$). Для каждой площадки и каждого блока детектирования (всего 20 наборов данных) были определены отношения площади комптоновской области спектра к площади пика полного поглощения 661кЭв (¹³⁷Cs), таблица 1. Там же приведены полученные экспериментально на референтных площадках значения калибровочных коэффициентов $c_{i,1,k}$.

Указанные экспериментальные данные позволили выполнить нелинейный регрессионный анализ и определить параметры функциональной зависимости (5) калибровочного фактора $c_{i,j,k}$ от отношения площади комптоновской области спектра к площади пика полного поглощения $N_{i,j,k,c}/N_{i,j,k,0}$ для всех блоков детектирования. Определение параметров нелинейной регрессии сведено к решению задачи аппроксимации дискретной зависимости степенной

Таблица 1 – Экспериментальные значения $c_{1,1,k}$ для построения нелинейной регрессионной зависимости калибровочного коэффициента от параметра $N_{1,1,k,c} / N_{1,1,k,o}$ для фотопика полного поглощения (^{137}Cs , 661 кЭв) правого сцинтилляционного детектора

k	Калибровочная площадка	$N_{1,1,k,c} / N_{1,1,k,o}$	$c_{1,1,k}$, Ки·км ⁻² ·сек	$\Delta c_{1,1,k}$, Ки·км ⁻² ·сек
1	Лес лиственный	2,9932	2,60	1,00
2	Пасека	0,7534	0,34	0,15
3	Пашня	1,034	0,69	0,16
4	Лес еловый	0,7742	0,30	0,12
5	Луг	0,9788	0,89	0,25

Таблица 2 – Значения параметров зависимости (2) для $i = 1$ (^{137}Cs , 661 кЭв)

j	Детектор	$a_{i,j,1}$ Ки·км ⁻² ·сек	$a_{i,j,2}$
1	Правый бортовой сцинтилляционный NaI(Tl)	0,5899	1,4465
2	Левый бортовой сцинтилляционный NaI(Tl)	0,6619	1,4356
3	Бортовой сцинтилляционный LaBr ₃ (Ce)	0,391	2,5407
4	Переносной полупроводниковый HP Ge	0,1498	2,2888

функцией. Коэффициенты $a_{i,j,1}$ и $a_{i,j,2}$ в выражении (5) подбираются так, чтобы сумма квадратов отклонений экспресс-оценки плотности загрязнения, выполненной с помощью мобильной лаборатории, от $\sigma_{i,k}$, полученных в лабораторных условиях традиционным методом, была минимальной (i – индекс радионуклида, j – индекс детектора, k – номер реперной площадки):

$$\sum_{k=1}^n \left\{ \left(\sigma_{i,k} - a_{i,j,1} \cdot \left(\frac{N_{i,j,k,c}}{N_{i,j,k,o}} \right)^{a_{i,j,2}} \cdot \frac{N_{i,j,k,o}}{T_{j,k}} \right)^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где n – количество калибровочных площадок.

Чтобы найти минимум суммы квадратов отклонений (6), можно взять частные производные по неизвестным коэффициентам, приравнять их нулю и решить полученную систему уравнений (найти коэффициенты). Ниже предлагается более простое решение. С помощью преобразования переменных нелинейную степенную модель калибровочного коэффициента (5) можно свести к линейной, если прологарифмировать левую и правую части:

$$\ln(c_{i,j}) = \ln(a_{i,j,1}) + a_{i,j,2} \cdot \ln\left(\frac{N_{i,j,c}}{N_{i,j,o}}\right), \quad (7)$$

Вводя обозначения $y = \ln(c_{i,j})$, $x = \ln(N_{i,j,c} / N_{i,j,o})$, $A = a_{i,j,2}$ и $B = \ln(a_{i,j,1})$, приведем (7) к линейному виду $y = A \cdot x + B$. Формулы для

определения коэффициентов линейной регрессии общеизвестны:

$$B = \frac{n \cdot \sum_{k=1}^n (x_k \cdot y_k) - \sum_{k=1}^n (x_k) \cdot \sum_{k=1}^n (y_k)}{n \cdot \sum_{k=1}^n (x_k^2) - (\sum_{k=1}^n (x_k))^2},$$

$$A = \frac{\sum_{k=1}^n (y_k)}{n} - B \cdot \frac{\sum_{k=1}^n (x_k)}{n}$$

Последовательно вычислив B и A , получим искомые коэффициенты нелинейной регрессии (5) $a_{i,j,1} = \exp(B)$ и $a_{i,j,2} = A$. Вычисления удобнее проводить с использованием программирования. В приложении Windows Microsoft Excel также реализован метод построения трендов путём аппроксимации нелинейной регрессионной зависимости степенной функцией. Значения параметров функциональной зависимости (5) калибровочного фактора для $i = 1$ (для ^{137}Cs , 661 кЭв) от отношения площади комптоновской области спектра к «чистой» площади пика полного поглощения для различных блоков детектирования приведены в таблице 2.

Значения параметров функциональной зависимости близки для одинаковых типов детекторов. Различие $a_{i,j,1}$ отражает наличие свинцовых коллиматоров на сцинтилляционных детекторах, существенно снижающих поток фотонов, а также отличие внутренних эффективностей регистрации детекторов.

Установлено, что из семи апробированных по критерию R^2 видов функциональных зависимостей степенная функция является наилучшим приближением для всех типов детекторов. В качестве обоснования выбора функциональной зависимости следует также указать, что при $N_c/N_0 \rightarrow 0$ значения регрессионной кривой стремятся к положительному конечному значению калибровочного коэффициента. Указанная область малых значений N_c/N_0 соответствуют ситуациям нахождения детектора в радиоактивном облаке в случае «свежего» аварийного выброса ^{137}Cs или сразу после выпадений радионуклидов на почву, когда миграционные процессы ещё не привели к значимому заглублению радионуклидов. Кроме того, при росте отношения N_c/N_0 значения калибровочного коэффициента растут быстрее линейной функции, но медленнее экспоненты, что и ожидается теоретически.

Регрессионная кривая не выходит за пределы погрешности экспериментальных оценок, таблица 1. В качестве горизонта прогноза (экстраполяции вперёд) принята половина области экспериментальных наблюдений $(2,9932-0,7534)/2 \approx 1,1$, таблица 1. Для экстраполяции назад – 0,4. Относительно высокое значение $s_{1,1,1}$ (таблица 1) связано с экранированием деревьями.

В случае радиологической аварии с более широким радионуклидным составом и/или с иной давностью выпадений на радиоактивном следе следует выбрать не менее пяти реперных площадок, обследовать их путём отбора образцов почвы с последующим лабораторным определением плотности загрязнения и далее актуализировать семейство калибровочных коэффициентов для новой радиологической аварии.

Так как при использовании представленного метода велика вероятность ошибок при проведении расчётов, в целях автоматизации указанных процессов разра-

ботано программное обеспечение для проведения измерений плотности загрязнения территории и калибровки спектрометров.

Заключение

Предложенный метод позволяет оперативно выполнять измерения плотности загрязнения почвы гамма-излучающими радионуклидами *in situ* в полевых условиях без отбора проб. Расширена область применения и снижена неопределённость ранее разработанного метода, применявшегося при радиологическом обследовании сельскохозяйственных земель, загрязнённых ^{137}Cs . Предложенный метод дистанционной оценки плотности загрязнения практически не вносит дополнительной ошибки. Продолжительность набора спектра и его автоматической обработки при плотности загрязнения ^{137}Cs более 100 кБк·м⁻² не превышает 1 мин.

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. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment / IAEA Safety Reports Series № 19. Vienna: IAEA, 2001. – 229 p.
3. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь / И.М. Богдевич [и др.]; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2020. – 45 с.
4. Bouzdalkin, K. Calibration factor as a function of gamma spectrum Compton plateau used for field spectrometry / K. Bouzdalkin // Measurements of radionuclides after the Chernobyl accident: abstract of XXVII SCI Pre-Symposium (Bergen, Norway, 6-8 June 1991) / Bergen. – 1991. – P. 63.
5. Буздалкин, К.Н. Автоматизированный мобильный комплекс контроля радиационной обстановки / К.Н. Буздалкин, Ю.М. Жученко, Л.А. Чунихин // Вісник Львів.ун-ту. Серія фіз. – 2010. – Вип.45. – С. 86-92.
6. Genie™ 2000 Spectroscopy Software. Customization Tools. 9233653J V3.4. – Meriden, USA: Canberra Industries. – 2013. – 571 p.

E.K. Nilova, K.N. Buzdalkin

**GEOMETRY FACTOR FOR *in-situ* SOIL
CONTAMINATION DENSITY ESTIMATION**

A method is proposed for estimating the density of soil contamination with gamma-emitting radionuclides ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) *in situ* (in the field without sampling). The method allows to take into account the peculiarities of the distribution of radionuclides along the soil profile at a given site by the ratio of scattered and non-scattered photon fluxes. The scope of application has been expanded and the uncertainty of the previously developed method used for radiological examination of agricultural lands contaminated with ^{137}Cs without sampling has been reduced. The proposed method of remote assessment of the pollution density practically does not introduce an additional error in comparison with the traditional method, which includes soil sampling and subsequent analysis in laboratory conditions. The duration of the spectrum set and its automatic processing at a ^{137}Cs contamination density of more than $100 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ does not exceed 1 min.

Key words: *radionuclides, pollution density, gamma spectrometer, in-situ*

Поступила 01.09.23