

Медико-биологические проблемы жизнедеятельности

Научно-практический рецензируемый журнал

№ 1(29)

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 30.04.23
Формат 60×90/8. Бумага мелованная.
Гарнитура «Times New Roman».
Печать цифровая. Тираж 130 экз.
Усл. печ. л. 15,5. Уч.-изд. л. 9,7.
Зак. 165.

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

№ 1(29)

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**

Д.А. Евсеенко, З.А. Дундаров, Ю.И. Галицкая

Патофизиологические аспекты свободнорадикальных механизмов формирования кожных рубцов

6

D. Evseenko, Z. Dundarov, Y. Galitskaya

Pathophysiological aspects of free radical mechanisms of formation of skin scars

Н.Д. Пузан, И.А. Чешик

Молекулярные механизмы действия ионизирующего излучения. Влияние облучения на белок (обзор литературы)

14

N.D. Puzan, I.A. Cheshik

Molecular mechanisms of effects of ionizing radiation action. Irradiation effect on protein (literary review)

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

Али Адиб Хуссейн Али, О.Е. Кузнецов
Элементный состав тканей в норме и при ожирении у крыс линии Wistar

27

A.A.H. Ali, O.E. Kuznetsov

Elemental composition of tissues in normal and obese Wistar rats

Е.К. Нилова, К.Н. Буздалькин

Методы экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории в чрезвычайных ситуациях

35

E.K. Nilova, K.N. Buzdalkin

Methods for express assessment of the radiation situation using a mobile laboratory in emergency situations

О.В. Шаховская, М.Н. Стародубцева, Е.А. Медведева

Характеристика радиочувствительности организмов с помощью параметров редокс-свойств плазмы крови

43

O.V. Shakhovskaya, M.N. Starodubtseva, A.A. Miadzvedzeva

Characteristics of radiosensitivity of organisms using parameters of redox properties of blood plasma

Клиническая медицина**Clinical medicine**

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

Факторы риска артериальной гипертензии у женщин с абдоминальным ожирением и гипертензивными расстройствами беременности в анамнезе

49

A.Yu. Zaharko, T.V. Statkevich, A.S. Podgor-naya, O.V. Murashko

Risk factors for arterial hypertension in women with abdominal obesity and hypertensive disorders of pregnancy in the history

Ж.М. Козич, В.Н. Мартинков, И.В. Вейлкин, Ж.Н. Пугачева, Д.А. Близин, Н.Н. Климович
Анализ эпидемиологических показателей множественной миеломы и клинических факторов, влияющих на течение заболевания

55

Zh.M. Kozich, V.N. Martinkov, I.V. Veyalkin, J.N. Pugacheva, D.A. Blizin, N.N. Klimkovich
Analysis of the epidemiological characteristics of multiple myeloma and clinical factors affecting the course of the disease

- А.В. Коротаев, А.М. Пристром, Е.П. Науменко, С.Н. Коржева, Л.Ф. Ларенко, Я.Л. Навменова**
Изменения биомеханики контрактильности миокарда левого желудочка: результаты проспективного динамического наблюдения 62
- А.V. Korotaev, A.M. Pristrom, E.P. Naumenko, S.N. Korzheva, L.F. Larenko, Ya.L. Navmenova**
Changes in the biomechanics of contractility of the myocardium of the left ventricle: results of prospective follow-up
- Д.К. Новик, В.Н. Мартинков, И.В. Веялкин, И.А. Искров, А.Е. Силин, Т.А. Рачкова, Н.Ф. Василевская, М.А. Бобырев, Ж.Н. Меренкова, Л.Л. Наваро, А.С. Урюпин, А.Л. Усс**
Региональные особенности первичной заболеваемости хроническими Ph-негативными миелопролиферативными заболеваниями в Беларуси 67
- D. Novik, V. Martinkov, I. Veyalkin, I. Iskrov, A. Silin, T. Rachkova, N. Vasilevskaya, M. Bobyrev, Zh. Merenkova, L. Navaro, A. Uryupin, A. Uss**
Regional features of the incidence of chronic Ph-negative myeloproliferative neoplasms in Belarus
- О.Л. Никифорова, Н.В. Галиновская, Е.В. Воропаев**
Оценка качества жизни пациентов, перенесших инфекцию COVID-19 в легкой и среднетяжелой формах 75
- O.L. Nikiforova, N.V. Galinovskaya, E.V. Voropaev**
Assessment of the quality of life of patients who have had COVID-19 infection, in mild and moderate forms
- А.С. Подгорная, А.Ю. Захарко, О.В. Мурашко, К.В. Бронская**
Миомэктомия: хирургическая тактика, репродуктивные исходы 82
- A.S. Podgornaya, A.Yu. Zaharko, O.V. Murashko, K.V. Bronskaya**
Myomectomy: surgical tactics, reproductive outcomes
- Ю.И. Ярец**
Показатели иммунного статуса у пациентов с хроническими ранами в зависимости от стадии инфекционного процесса и структуры микробиоты раны 89
- Y.I. Yarets**
Indicators of the immune status in patients with chronic wounds depending on the stage of the infectious process and the structure of the wound microbiota
- N.V. Kholupko, E.N. Vaschenko, Ya.L. Navmenova, M. Wisham, A.E. Filyustin, A.V. Korotaev, E.N. Kholupko, V.A. Zhuravlev, M.G. Rusalenko**
A clinical case of ectopic ACTH syndrome: diagnostic difficulties 99
- Н.В. Холупко, Е.Н. Ващенко, Я.Л. Навменова, М. Вишам, А.Е. Филюстин, А.В. Коротаев, Е.Н. Холупко, В.А. Журавлев, М.Г. Русаленко**
АКТГ-синдром: трудности диагностики

Обмен опытом**Experience exchange**

- Е.В. Дорофей**
Отношение подростков, проживающих в зоне наблюдения Белорусской АЭС, к радиационной безопасности 105
- E.V. Dorofei**
Attitude of teenagers living in the supervision zone of the Belarusian NPP to radiation safety

Н.Г. Кадочкина, Е.В. Родина, А.П. Саливончик, Д.И. Гавриленко

Клинический случай: кардиальный синкопе у пожилой пациентки

110

N.G. Kadochkina, E.V. Rodzina, A.P. Salivontchik, D.I. Haurylenka

Cardiac syncope in an elderly patient: a clinical case from practice

В.С. Смирнов, А.О. Жарикова, О.И. Ананченко, О.И. Дудузова, А.В. Жарикова

Энцефалит Расмуссена (обзор и клинический случай)

116

V.S. Smirnov, A.O. Zharikova, O.I. Ananchenko, O.I. Duduzova, A.V. Zharikova

Rasmussen's encephalitis (review and clinical case)

**МЕТОДЫ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ
ОБСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОБИЛЬНОЙ
ЛАБОРАТОРИИ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

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

Разработаны методы экспресс-оценки радиационной обстановки *in situ* с использованием мобильной лаборатории. Предложенные методы позволяют при принятии решений о применении защитных мер в острый период радиационной аварии оперативно оценить значения объемной активности воздуха в зоне дыхания (Бк м^{-3}) и плотность загрязнения территории гамма-излучающими радионуклидами (Бк м^{-2}), а при обнаружении локального источника ионизирующего излучения – его активность (Бк). Расширена область применения и снижена неопределенность ранее разработанного метода, применявшегося при радиологическом обследовании сельскохозяйственных земель, загрязнённых цезием-137, без отбора проб. Установлено, что при наличии на радиоактивном следе не только цезия-137, но и цезия-134, кобальта-60, йода-131, предложенный методический подход позволяет оперативно выбрать подходящие области спектра для каждого загрязнителя и откалибровать блоки детектирования на актуальный радионуклидный состав.

Ключевые слова: радионуклид, радиационная безопасность, радиационная защита, плотность загрязнения, метод оценки

Введение

В зависимости от категории объекта и видов деятельности, обусловивших возникновение аварийной ситуации с ионизирующим излучением, экспресс-оценку радиационной обстановки с применением мобильных лабораторий можно свести к двум основным операциям: во-первых, к уточнению уровней загрязнения радионуклидами приземного слоя атмосферы (Бк). Значения амбиентного эквивалента мощности дозы гамма-излучения на местах проведения аварийно-спасательных работ и пути следования к ним необходимы при нормировании продолжительности проведения работ, а концентрация радионуклидов в зоне дыхания – для обоснования применения средств защиты органов дыхания при выполнении ряда спасательных опера-

ций. Оценка уровней загрязнения воды, основных продуктов питания местного производства и содержания радионуклидов в организме местных жителей проводится, как правило, в более поздний период после формирования радиоактивного следа.

Практика показывает [1], что высокая дисперсность радиоактивных выпадений не позволяет с достаточной достоверностью оценить все пути облучения местного населения и спасателей, обосновать и предложить, при необходимости, адекватные меры радиационной защиты. После аварии на радиационном объекте и выпадений радионуклидов на почву проводится оперативное уточнение прогнозных значений объемной активности воздуха в зоне дыхания и плотности загрязнения почвы, полученных ранее расчётным путём с помощью моделей переноса радиоактивной

примеси в атмосфере. Указанные параметры радиационной обстановки принято уточнять путём отбора проб аэрозолей и почвы с последующим их анализом в лабораторных условиях, затратным как по времени, так и по ресурсам.

Обычно оценка объёмной активности приземного слоя атмосферы выполняется путём гамма-спектрометрии воздушных фильтров в лабораторных условиях, а в случае присутствия «чистых» альфа- и бета-излучателей (изотопов плутония, америция-241, стронция-90 и т.д.) – с последующим озонением фильтров, последовательным радиохимическим выделением радионуклидов и электроосаждением на мишень с альфа-спектрометрическим окончанием, что занимает несколько суток с риском получить измеряемую активность меньше минимально детектируемой [2]. Поэтому в ряде случаев [3, 4] применяется расчётный метод экспресс-оценки объёмной активности по известной плотности загрязнения территории [5].

В то же время в большинстве случаев основными дозоформирующими радионуклидами в выбросе являются гамма-излучатели, что позволяет использовать полевые (*in situ*) методы экспресс-оценки объёмной активности воздуха и плотности загрязнения почвы с точностью, вполне приемлемой для поставленных целей [6, 7, 8, 9]. Достоверность оценки средних значений указанных параметров при этом выше, так как смягчаются эффекты как рельефа местности, приводящие к неопределённости скорости осаждения радионуклидов, так и микрорельефа почвы, приводящие к значительной дисперсии результатов анализа проб, отобранных буром [10].

Основная проблема, сдерживающая применение дистанционных методов оценки указанных параметров, заключается в необходимости учёта «геометрии» источника. Например, в случае оценки плотности загрязнения необходимо быть уверенным в распределении 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.

Общеизвестно, что оперативная информация об уровнях загрязнения приземного слоя атмосферы и территории в случае радиационной аварии является основой построения долгосрочных прогнозов ожидаемых доз внешнего и внутреннего облучения населения, планирования защитных мер. Соответственно, представляет интерес и экспресс-методы определения указанных параметров, исключаящие отбор проб, их доставку и подготовку, лабораторные процедуры.

Цель исследований – разработать методы экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории в чрезвычайных ситуациях.

Исследования финансируются в рамках мероприятия 13 «Выполнение работ по оказанию научно-технической поддержки Министерству по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности» Государственной программы Республики Беларусь «Наукоемкие технологии и техника» на 2021-2025 годы (подпрограмма 3 «Научное обеспечение эффективной и безопасной работы Белорусской атомной электростанции и перспективных направлений развития атомной энергетики»).

Материал и методы исследования

В исследованиях применялась мобильная лаборатория радиационного контроля, представляющая собой комплекс спектрометрического и дозиметрического оборудования, размещенного на базе малотоннажного грузового автомобиля. На борту автомобиля установлено оборудование и программное обеспечение производства Mirion Technologies (США), «Атомтех» (Беларусь) и «VRSS UI» (Литва), в том числе бортовые сцинтилляционные гамма-спек-

трометры (боковые с размерами кристалла NaI(Tl) 7,62×7,62 см и передний LaBr₃(Ce) 2,54×2,54 см, помещенные в свинцовые коллиматоры толщиной 5 см), а также переносной гамма-спектрометр высокого разрешения «Falcon 5000» (США) с полупроводниковым германиевым детектором.

Оборудование позволяло оценивать радиационную обстановку в единицах скорости счета, имп·с⁻¹. Нормативные правовые акты Республики Беларусь, как и международные рекомендации, требуют результаты представлять, в частности, в значениях активности, Бк, объемной активности, Бк·м⁻³ и плотности загрязнения, Бк·м⁻². Поэтому в ходе исследований параллельно решалась проблема адаптации функциональных характеристик и выходных параметров оборудования мобильной лаборатории для получения необходимых количественных характеристик.

На борту мобильной лаборатории установлена профессиональная метеостанция Luft WS400 компании G. Luft Mess- und Regeltechnik GmbH (Германия) и сертифицированное МАГАТЭ программное обеспечение, которое позволяет уточнить прогноз развития радиационной обстановки в точке местонахождения автомобиля в данный момент. Датчики метеостанции обеспечивают непрерывное измерение температуры и влажности воздуха, атмосферного давления. Для измерения количества осадков и их типа применяется датчик с доплеровским радаром. Бортовой GPS-датчик с функцией WAAS (глобальная система дифференциальных поправок) производства Garmin (США) позволяет определять местоположение по информации с 12 спутников с точностью менее 3 метров без использования внешнего приемника сигналов радиомаяков DGPS.

Объектами исследования являлись гамма-спектры от источников гамма-излучения различной геометрии и участков территории с различным распределением радионуклидов по профилю почвы.

При проведении исследований применялись спектрометрические методы иссле-

дований, математическое моделирование и программирование.

Результаты исследования

При расчёте активности источника гамма-излучения, в том числе удельной активности и плотности поверхностного загрязнения, используется 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, Бк·м⁻³ или Бк·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 которого вычтено значение «постаменты», 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.

В общем случае при оценке загрязнения объекта i -ым радионуклидом по одной гамма-линии калибровочный фактор η_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:

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

Ниже предлагаются калибровочные факторы для оценки уровней загрязнения

различных объектов. Методы предназначены для применения в полевых условиях (*in situ*) с использованием мобильной лаборатории, на борту которой установлены детекторы гамма-излучения с многоканальными анализаторами импульсов и компьютером. Все приведённые ниже расчётные формулы компьютерно-ориентированы. При *in situ* измерениях уровней загрязнения радионуклидами приземного слоя атмосферы и территории, а также определении активности обнаруженных источников ионизирующего излучения, значение $N_{i,0}$ в выражении (1) всегда равно нулю. Доаварийный уровень загрязнения объектов указанным радионуклидом априори неизвестен и при расчётах считается ничто малым.

При экспресс-оценке активности источника, Бк, расстояние до которого значительно превышает его размер (и диаметр детектора), предлагается использовать следующее приближение для расчёта геометрического фактора $g_i(E)$ в выражении (2):

$$g_i(E) \approx \frac{d^2}{16 \cdot r^2} \cdot e^{-(\mu_a(E) \cdot r + \mu_h(E) \cdot r_h + \mu_c(E) \cdot r_c)}, \quad (3)$$

где d – диаметр детектора, м,

r – расстояние от источника до детектора, м;

$\mu_a(E)$ – линейный коэффициент ослабления гамма-квантов с энергией E в воздухе, m^{-1} ,

$\mu_h(E)$ – линейный коэффициент ослабления гамма-квантов с энергией E в материале стенки контейнера источника, m^{-1} (при наличии контейнера, при отсутствии принимается $\mu_h(E) = 0$),

r_h – толщина стенки контейнера, м,

$\mu_c(E)$ – линейный коэффициент ослабления гамма-квантов с энергией E в материале кузова автомобиля, m^{-1} ,

r_c – толщина кузова автомобиля, м.

В формуле (3) отражена доля потока фотонов, достигающих с исходной энергией поверхности детектора, расположенного в свинцовом коллиматоре (площадь открытой поверхности детектора $\pi \cdot d^2/4$, площадь сферы радиусом $r - 4 \cdot \pi \cdot r^2$). Из (1), (2) и (3) следует, что

$$A_i \approx \frac{1}{\eta_i \cdot \varepsilon'_i(E)} \cdot \frac{8 \cdot r^2}{d^2} \cdot \exp(\mu_a(E) \cdot r + \mu_h(E) \cdot r_h + \mu_c(E) \cdot r_c) \cdot \frac{N_{i,0}}{T}, \quad (4)$$

В выражении (4) учтено, что внутренняя эффективность регистрации $\varepsilon_i(E)$ в формуле (2) приблизительно в два раза выше измеряемой эффективности регистрации $\varepsilon'_i(E)$, $Bk^{-1} \cdot c^{-1}$, которую можно установить, прижав точечные эталонные источники к центру рабочей поверхности детектора. $\varepsilon'_i(E)$ неявно учитывает геометрические особенности традиционной калибровки, во время которой половина фотонов, испускаемых эталонным источником, не попадает на детектор.

Объёмную активность воздуха, $Bk \cdot m^{-3}$, т.е. радиоактивного облака, в котором размещена мобильная лаборатория в раннюю фазу аварии, можно оценить по формуле:

$$A_i^{air} \approx \frac{1}{\eta_i \cdot \varepsilon'_i(E)} \cdot \frac{8 \cdot \mu_a}{\pi \cdot d^2} \cdot \exp(\mu_c(E) \cdot r_c) \cdot \frac{N_{i,0}}{T}, \quad (5)$$

В случае нахождения автомобиля в облаке, геометрия источника гамма-излучения соответствует равномерно загрязнённой бесконечной четверти пространства, что и отражено в геометрическом факторе, присутствующем в выражении (5). Установлено, что поток гамма-квантов цезия-137 (662 кЭв) на рабочую поверхность детектора от точечного источника активностью 1 МБк, расположенного на расстоянии 10 м от детектора, равен потоку от окружающего воздуха с объёмной активностью цезия-137 30 $Bk \cdot m^{-3}$. Минимальная детектируемая объёмная активность – порядка 10 $Bk \cdot m^{-3}$, т.е. достаточно низкая для оценки радиационной обстановки в аварийных условиях.

Область применения ранее разработанного метода оценки плотности загрязнения [8, 9], $Bk \cdot m^{-2}$, расширена на более широкий состав гамма-излучающих радионуклидов. В отличие от зоны чернобыльского загрязнения, где из гамма-излучающих радионуклидов практическое значение имеет только цезий-137, при мониторинге территории в зоне воздействия Белорусской АЭС необходимо, согласно законодательству о ядерной и радиационной безопасности,

оценивать плотность загрязнения гамма-излучающих йодом-131, цезием-134 и 137, кобальтом-60. В случае аварийных выбросов радионуклидный состав может быть значительно шире. Разрешение детекторов по энергии (на линии 662кЭв NaI(Tl) – 6,1% и 6,3%, LaBr₃ – 2,9%, BeGe – 0,15%) позволяет выполнить указанный анализ.

При оценке плотности загрязнения участка территории *i*-ым радионуклидом в формуле (1) в качестве приближения калибровочного фактора предлагается использовать степенную функцию, которая соответствует описываемому физическому процессу, в том числе при предельных значениях отношения интеграла в комптоновской области спектра к «чистой» площади фотопика полного поглощения:

$$\sigma_i \approx a_{i,1} \cdot \left(\frac{N_{i,c}}{N_{i,0}} \right)^{a_{i,2}} \cdot \frac{N_{i,0}}{T}, \quad (6)$$

где σ_i – плотность загрязнения участка территории *i*-ым радионуклидом, Бк·м²,

$a_{i,1}$ и $a_{i,2}$ – коэффициенты регрессионных кривых, размерность $a_{i,1}$ – Бк·м²·с,

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

Подход, приведённый в выражении (6), позволяет учесть абсолютную эффективность регистрации гамма-квантов, испускаемых *i*-ым радионуклидом, распределённым по профилю почвы, в том числе внутреннюю эффективность детектора. Преимуществом метода является возможность автоматически учитывать рассеяние в верхнем слое почвы потоков гамма-квантов от всех гамма-излучающих радионуклидов. Вкладом в аппаратную линию спектра природных радионуклидов уранового ряда в случае незапланированных и, тем более, аварийных выбросов можно пренебречь. При использовании указанного метода вносимая в результаты измерения дополнительная погрешность на порядок ниже погрешности оценки средней плотности загрязнения территории традиционным методом [10], связанным с отбором образцов почвы.

Для калибровки метода, т.е. определения значений коэффициентов регрессионного уравнения (6), 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. В случае радиологической аварии рекомендуется выбрать не менее пяти референтных площадок, отобрать образцы почвы, в лабораторных условиях определить плотность загрязнения площадок радионуклидами и рассчитать семейство калибровочных коэффициентов.

Для проверки предложенного подхода проведена калибровка по цезию-137 как полупроводникового, так и сцинтилляционных детекторов, размещенных как в кузове автомобиля, так и на штативе на местности. Установлено, что значения коэффициентов в функциональной зависимости (6) близки для одинаковых типов детекторов. Различие коэффициентов регрессионных кривых отражает наличие свинцовых коллиматоров на сцинтилляционных детекторах, существенно снижающих поток фотонов, а также отличие внутренних эффективностей регистрации детекторов. Установлено, из семи апробированных по критерию R² 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 «свежего» аварийного выпадения радионуклидов на почву, когда миграционные процессы ещё не привели к значимому их заглублению. При росте отношения N_c/N_0 значения калибровочного коэффициента растут быстрее линейной функции, но медленнее экспоненты, что и

ождается теоретически. Регрессионные кривые не выходят за пределы погрешности экспериментальных оценок. В качестве горизонта прогноза (экстраполяции) принимается половина области экспериментальных наблюдений.

Погрешность оценки средней по участку плотности загрязнения традиционным методом (относительная погрешность с учётом ошибки прибора и стандартного отклонения выборочного среднего значения, определённая путём отбора пяти проб почвы «конвертом» с последующей пробоподготовкой и гамма-спектрометрией в лабораторных условиях) составила $23 \div 42\%$. Погрешности определения спектральных характеристик (интегралов области спектра, «чистых» площадей пиков полного поглощения и времени набора спектра) $< 1\%$, что значительно ниже погрешности определения плотности загрязнения традиционным методом. Предложенный метод дистанционной оценки плотности загрязнения практически не вносит дополнительной ошибки. При использовании предложенного метода *in situ* продолжительность набора спектра при плотности загрязнения цезием-137 более $150 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$ и его автоматической обработки не превышает 1 мин. Минимальная детектируемая объёмная активность оценивается в $10 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$ ($0,27 \text{ Ки} \cdot \text{км}^{-2}$), т.е. меньше установленного нижнего уровня вмешательства $37 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$ ($1 \text{ Ки} \cdot \text{км}^{-2}$).

В исследованиях также рассматривалась «переходная стадия» острой фазы радиологической аварии, когда после или в течение аварийного выброса радионуклидов радиоактивный след на местности окончательно не сформировался. Как правило, указанный период не продолжителен по времени для конкретного участка местности.

При продолжающемся осаждении радионуклидов на почву из атмосферы в некоторых обстоятельствах необходимо одновременно оценивать и объёмную активность, и плотность загрязнения. Для такой оценки требуется дополнительная

информация о продолжительности и мощности выброса, а также результаты моделирования переноса и осаждения радиоактивной примеси в атмосфере. К моменту прибытия мобильной лаборатории в зону воздействия аварийного объекта указанный прогноз, как правило, подготовлен. Установленная на борту метеостанция и программное обеспечение позволяют уточнить прогноз развития радиационной обстановки на данном участке и оценить соотношение потоков гамма-квантов на детектор от почвы и от загрязнённого приземного слоя атмосферы. Используя указанное соотношение и регистрируемый суммарный поток фотонов можно рассчитать приближённые значения объёмной активности воздуха и плотности загрязнения участка в данный момент.

Для предотвращения ошибок расчёты указанных параметров радиационной обстановки были автоматизированы. Разработано программное обеспечение для проведения измерений активности источников, объёмной активности воздуха и плотности загрязнения территории, калибровки спектрометров. В штатное программное обеспечение мобильной лаборатории радиационного контроля «Genie 2000» (Mirion Technologies, США) дополнительно установлены приложения, позволяющие при движении автомобиля анализировать спектр и рассчитывать указанные параметры, автоматически формировать отчёты требуемого формата и архивировать результаты гамма-спектрометрии. Программное обеспечение реализовано в виде отдельных приложений, выполняющихся параллельно и независимо от других задач, не влияющих на производительность уже установленного программного обеспечения «Genie 2000» (США), «Atech» (Беларусь) и «VRSS UI» (Литва). При разработке использованы возможности пакетной среды штатного программного обеспечения Genie 2000 мобильной лаборатории [11] и операционной системы Windows. Разработаны соответствующие Windows-приложения

(прикладные программы) и Windows-сервис. При использовании сервиса участие оператора не требуется. На каждом этапе обработки отслеживаются события, проводится анализ возможных ошибок, опционально формируются соответствующие сообщения оператору и ведётся специальный системный журнал. Выходными данными являются значения активности источника (Бк), объемной активности воздуха ($\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$), плотности загрязнения территории радионуклидами ($\text{кБк}\cdot\text{м}^{-2}$, $\text{Ки}\cdot\text{км}^{-2}$) и погрешности их измерения.

Заключение

В результате проведенных исследований разработаны методы экспресс-оценки радиационной обстановки *in situ* с применением мобильной лаборатории. Предложенные методы позволяют при принятии решений о применении защитных мер в острый период радиологической аварии оперативно оценить значения объемной активности воздуха в зоне дыхания ($\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$) и плотность загрязнения территории гамма-излучающими радионуклидами ($\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}$), а при обнаружении локального источника ионизирующего излучения – его активность (Бк).

Расширена область применения и снижена неопределенность ранее разработанного метода, применявшегося при радиологическом обследовании сельскохозяйственных земель, загрязнённых цезием-137, без отбора проб. Установлено, что при наличии на радиоактивном следе не только цезия-137, но и цезия-134, кобальта-60, йода-131, предложенный методический подход позволяет оперативно выбрать подходящие области спектра для каждого загрязнителя и откалибровать блоки детектирования на актуальный радионуклидный состав.

Библиографический список

1. Буздалкин, К.Н. Уточнённые карты загрязнения трансурановыми элементами белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / К.Н. Буздалкин, Н.Г. Власова // Медико-

биологические проблемы жизнедеятельности. – 2019. – № 2(22). – С. 24-29.

2. Буздалкин, К.Н. Мониторинг ожидаемых доз облучения спасателей в случаях пожаров на территории радиоактивного загрязнения / К.Н. Буздалкин, Е.К. Нилова, А.Б. Кухтевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2015. – № 10(2). – С. 61-64.

3. Буздалкин, К.Н. Ингаляционное поступление трансурановых элементов в организм при чрезвычайных ситуациях в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / К.Н. Буздалкин, В.Н. Бортновский // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2019. – № 3. – С. 59-65.

4. Буздалкин, К.Н. Подъём радионуклидов при демаркации границы в зоне отчуждения ЧАЭС: объемная активность и ожидаемые дозы внутреннего облучения работников / К.Н. Буздалкин, О.М. Жукова // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления: материалы международной научно-практической конференции (Обнинск, 19-21 апреля 2016) / НПО «Тайфун» – Обнинск, 2016. – С. 21.

5. Буздалкин, К.Н. Метод оперативной оценки доз облучения персонала, ожидаемых в результате ингаляции радионуклидов при тушении пожаров / К.Н. Буздалкин // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2019. – № 1 (21). – С. 36-42.

6. Beck, H.L. *In situ* Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry. Report HASL-258./ H.L. Beck, J. DeCampo, C. Gogolak // NY: USAEC, Health and Safety Laboratory. – 1972.

7. Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency / International atomic energy agency IAEA-TECDOC-1092. – Vienna, 1999. – 305 p.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Genie™ 2000 Spectroscopy Software. Customization Tools. 9233653J V3.4. – Meriden, USA: Canberra Industries. – 2013. – 571 p.

E.K. Nilova, K.N. Buzdalkin

**METHODS FOR EXPRESS ASSESSMENT OF THE RADIATION SITUATION
USING A MOBILE LABORATORY IN EMERGENCY SITUATIONS**

Methods for express assessment of the radiation situation in situ with the use of a mobile laboratory have been developed. During making decisions on protective measures application in the acute period of a radiological accident, the proposed methods make it possible to promptly assess the values of the volumetric activity of air in the breathing zone ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) and the contamination density of the territory with gamma-emitting radionuclides ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$). These methods also allow to determine the activity (Bq) of the detected local radiation source. The scope of application has been expanded and the uncertainty of the previously developed method used for radiological survey of agricultural lands contaminated with cesium-137 without sampling has been reduced. It has been established that in the presence of not only caesium-137, but also caesium-134, cobalt-60, and iodine-131 on the radioactive trace, the proposed methodological approach makes it possible to quickly select the appropriate spectral regions for each pollutant and calibrate the detection units for the current radionuclide composition.

Key words: *radionuclide, radiation safety, radiation protection, contamination density, assessment method*

Поступила 27.02.23