

Медико-биологические проблемы жизнедеятельности

Научно-практический рецензируемый журнал

№ 2(32)

2024 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 27.09.24
Формат 60×90/8. Бумага мелованная.
Гарнитура «Times New Roman».
Печать цифровая. Тираж 120 экз.
Усл. печ. л. 21,25. Уч.-изд. л. 12,94.
Зак. 524.

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), Н.Н. Веякина (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. Кортаев (к.м.н., доцент), А.Н. Лызилов (д.м.н., профессор),
А.В. Макарич (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. Алейникова
(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), 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 (Минск),
В.Ю. Рыбников (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), 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

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», 2024

№ 2(32)

2024

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

**А.В. Рожко, С.В. Зыблева, А.В. Жарикова,
В.М. Мицура, Н.Н. Багинская**

Роль государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека» в системе здравоохранения и перспективы его развития

7

Э.В. Вист, А.В. Бойко, М.М. Селицкий

Воспаление как движущая сила нейродегенерации. Основы персонализированной диагностики и лечения (обзор литературы)

15

**Ж.М. Козич, В.Н. Мартинков, Н.Н. Климович,
Т.В. Руденкова, С.А. Костюк,
Н.В. Сердюкова**

Новые подходы в диагностике и терапии множественной миеломы (обзор литературы)

23

Н.И. Тимофеева, Е.Г. Жук

Оценка жесткости паренхимы почечного аллотрансплантата сдвиговой волновой соноэластографией (обзор литературы)

29

Медико-биологические проблемы

**Т.Э. Владимирская, И.Э. Адзериho,
А.М. Устемчук**

Оценка эндотелиального апоптоза в легочных артериях крыс с монокроталин-индуцированной легочной артериальной гипертензией

37

**Н.Г. Власова, К.Н. Буздалькин, Л.Н. Эвентова,
А.Н. Матарас, Г.Н. Евтушкова,
Д.Б. Куликович**

Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения в условиях неопределенности и неполных данных СИЧ-измерений

44

Д.Б. Куликович

Сравнительный анализ методов реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно-загрязненной территории

50

Reviews and problem articles

**A.V. Rozhko, S.V. Zybleva, A.V. Zharikova,
V.M. Mitsura, N.N. Baginskaya**

The role of state institution «Republican research center for radiation medicine and human ecology» in the healthcare system and its development prospects

E.V. Vist, A.V. Boika, M.M. Sialitski

Inflammation as a driving force of neurodegeneration. Fundamentals of personalized diagnostics and treatment

**Zh.M. Kozich, V.N. Martinkov, N.N. Klimovich,
T.V. Rudenkova, S.A. Kostyuk,
N.V. Serdyukova**

New approaches in the diagnosis and treatment of multiple myeloma (review)

N.I. Timofeeva, E.G. Zhuk

Shear wave ultrasound elastography in assessing the stiffness of the renal allograft parenchyma (literature review)

Medical-biological problems

**T.Ye. Vladimirskaja, I.Ye. Adzeriho,
A.M. Ustemchuk**

Assessment of endothelial apoptosis in the pulmonary arteries of rats with monocrotaline-induced pulmonary arterial hypertension

**N.G. Vlasova, K.N. Buzdalkin, L.N. Eventova,
A.N. Mataras, G.N. Yevtushkova,
D.B. Kulikovich**

Reconstruction of individualized radiation doses under conditions of uncertainty and incomplete of whole-body γ -spectrum analyzer measurement data

D.B. Kulikovich

Comparative analysis of methods for reconstruction of individualized external exposure doses to population living in a radioactively contaminated territory

Е.В. Мартищенко, Н.Д. Пузан, Г.З. Гутцева, И.А. Чешик

Результаты опроса респондентов Гомельской и Витебской областей относительно наиболее часто используемых в повседневной жизни устройств (видов связи)

58

Е.К. Нилова, К.Н. Буздалкин

Методология экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории

65

Т.В. Переволоцкая, А.Н. Переволоцкий

Оценка радиационной обстановки и внешнего облучения работников лесного хозяйства при проведении работ в I и II зонах радиоактивного загрязнения

73

Д.В. Чарнаштан, Ю.В. Бондарева, Ф.Н. Карпенко, М.П. Потапнев, Н.В. Чуешова, Н.Н. Веялкина, Н.Г. Мальцева, Э.А. Надыров, Д.А. Зиновкин, В.И. Николаев

Доклиническая оценка эффективности интрамедуллярной биокompозитной костной пластики в ранние сроки после имплантации бесцементного бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава у лабораторных крыс

79

Н.В. Чуешова, В.М. Щемелев, Е.А. Щурова, И.А. Чешик

Антиоксидантная система печени крыс-самцов на разных этапах онтогенеза в условиях хронического воздействия электромагнитного поля низкой интенсивности

87

Клиническая медицина

А.Ю. Захарко, А.С. Подгорная, О.В. Мурашко, М.Ю. Жандаров, А.Р. Ромбальская

Анализ случаев гладкомышечных опухолей матки с неопределенным злокачественным потенциалом (STUMP) в ГУ «РНПЦ радиационной медицины и экологии человека»

95

E.V. Martischenkova, N.D. Puzan, G.Z. Gutseva, I.A. Cheshik

The results of the survey of respondents of the Gomel and Vitebsk regions regarding the most commonly used devices (types of communication) in everyday life

E.K. Nilova, K.N. Buzdalkin

Methodology for express assessment of the radiation situation using a mobile laboratory

T.V. Perevolotskaya, A.N. Perevolotsky

Assessment of the radiation situation and external exposure of forestry workers during work in the I and II zones of radioactive contamination

D.V. Charnashtan, Yu.V. Bondareva, F.N. Karpenko, M.P. Potapnev, N.V. Chueshova, N.N. Vejalkina, N.G. Mal'ceva, E.A. Nadyrov, D.A. Zinovkin, V.I. Nikolaev

Preclinical evaluation of the effectiveness of intramedullary biocomposite bone grafting in the early period after implantation of cementless femoral component of hip arthroplasty in laboratory rats

N.V. Chueshova, V.M. Schemelev, E.A. Shchurova, I.A. Cheshik

Antioxidant system of the liver of male rats at different stages of ontogenesis under conditions of chronic exposure to low-intensity electromagnetic field

Clinical medicine

A.Yu. Zaharko, A.S. Podgornaya, O.V. Murashko, M.Yu. Zhandarov, A.R. Rombalskaya

Analysis of cases of smooth muscle tumors of the uterus with uncertain malignant potential (STUMP) at the SI «Republican research center for radiation medicine and human ecology»

| | | | |
|--|-----|---|--|
| С.Л. Зыблев, А.Е. Силин, В.Н. Мартинков, С.В. Зыблева, А.В. Величко, Б.О. Кабешев | | S.L. Zyblev, A.E. Silin, V.N. Martinkov, S.V. Zybleva, A.V. Velichko, B.O. Kabeshev | |
| Динамика уровня такролимуса у реципиентов почечного трансплантата | 100 | Dynamics of tacrolimus levels in renal transplant recipients | |
| С.А. Иванов, О.Г. Хоров, А.М. Юрковский, А.С. Богомаз | | S.A. Ivanov, O.G. Khorov, A.M. Yurkovsky, A.S. Bogomaz | |
| Замещение дефектов наружного носа с использованием хрящевых аллогraftов: послеоперационные осложнения и косметические результаты | 105 | Nasal defect reconstruction using cartilage allografts: postoperative complications and cosmetic outcomes | |
| Т.Х. Нгуен, Д.Ш. Нгуен, В.Д. Чан, Ф.К. Дао, Т.Б.Л. Нгуен, М.Т. Нгуен | | T.H. Nguen, D.Sh. Nguen, V.D. Chan, F.K. Dao, T.B.L. Nguen, M.T. Nguen | |
| Распространенность респираторных симптомов у рабочих промышленных предприятий | 111 | Prevalence of respiratory symptoms in industrial workers | |
| И.А. Новикова, К.С. Макеева, Е.Ф. Мицура | | I.A. Novikova, K.S. Makeyeva, E.F. Mitsura | |
| Параметры функциональной активности нейтрофилов у детей с наследственным сфероцитозом | 121 | Parameters of neutrophil functional activity in children with hereditary spherocytosis | |
| Э.А. Повелица, О.В. Пархоменко, В.А. Рожко, В.А. Доманцевич, А.В. Доманцевич, А.А. Чулков, А.М. Шестерня, О.Г. Жариков | | E.A. Povelitsa, O.V. Parhomenko, V.A. Rohko, V.A. Domantsevich, A.V. Domantsevich, A.A. Chulkov, A.M. Shesternya, O.G. Zharikov | |
| Хирургическое лечение андрогенитальных проявлений варикозной болезни малого таза | 127 | Surgical treatment of androgenital manifestations of pelvic vein disease | |
| Э.А. Повелица, О.В. Пархоменко, В.А. Рожко, В.А. Доманцевич, А.М. Шестерня | | E.A. Povelitsa, O.V. Parhomenko, V.A. Rozhko, V.A. Domantsevich, A.M. Shesternya | |
| Микрохирургическая флэбэктомия вен семенного канатика с использованием системы визуализации 3d NGENUITY | 136 | Microsurgical phlebectomy of the spermatic cord veins using the 3d NGENUITY visualization system | |
| Е.В. Родина, Д.И. Гавриленко, Н.И. Корженевская, О.А. Романива, А.П. Саливончик, Н.Г. Кадочкина, С.Н. Коржева, Е.В. Семеняго, Е.П. Науменко | | A.V. Rodzina, D.I. Haurylenka, N.I. Korzhaneuskaya, A.A. Romaniva, A.P. Salivontchik, N.G. Kadotchkina, S.N. Korzhava, Ye.V. Semeniah, A.P. Naumenka | |
| Структурно-функциональные изменения сердца у пациентов, перенесших ИНФЕКЦИЮ COVID-19 | 142 | Structural and functional cardiac changes in patients with COVID-19 infection | |
| А.А. Чулков, З.А. Дундаров, А.В. Величко, Б.О. Кабешев, Э.А. Повелица, Я.Л. Навменова, Ю.И. Ярец | | A.A. Chulkov, Z.A. Dundarov, A.V. Velichko, B.O. Kabeshev, E.A. Povelitsa, Ya.L. Navmenova, Yu.I. Yarets | |
| Клинико-лабораторная оценка функции гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси у пациентов после унилатеральной адреналэктомии | 148 | Clinical and laboratory evaluation of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis function in patients after unilateral adrenalectomy | |

Обмен опытом**Experience exchange****А.В. Жарикова, Н.В. Лысенкова**

Мультидисциплинарный подход — залог успешности лечения пациентов с хронической мигренью

154

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

ACUM — редкая мюллеровая патология (клинический случай)

161

Н.В. Холупко, Я.Л. Навменова, Е.С. Махлина, А.В. Коротаев, А.В. Рожко

Амиодарон-индуцированный тиреотоксикоз: клинический случай

167

A.V. Zharikova, N.V. Lysenkova

Multidisciplinary approach is the key to successful treatment of patients with chronic migraine

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

ACUM — rare mullerian pathology (clinical case)

N.V. Kholupko, Ya.L. Navmenova, E.S. Makhlina, A.V. Korotaev, A.V. Rozhko

Amiodarone-induced thyrotoxicosis: a clinical case

Таким образом, можно констатировать о необходимости проведения дифференцированной информационно-просветительской и другой профилактической работы с населением по вопросам безопасного использования различных технических устройств и видов связи с учетом региона проживания граждан (проживающие на «условно чистых» и загрязненных радионуклидами территориях), а также с учетом социально-демографических (пол, возраст, образование) и территориальных (регион

и тип населенного пункта) характеристик представителей целевой аудитории.

Библиографический список

1. Верещако, Г.Г. Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на состояние мужской репродуктивной системы и потомства / Г.Г. Верещако. – Минск: Беларуская наука, 2015. – 190 с.
2. Owolabi, J. Perceptions and experiences about device-emitted radiofrequency radiation and its effects on selected brain health parameters in Southwest Nigeria / J. Owolabi, O.S. Ilesanmi, A. Luximon-Ramma // Cureus. – 2021. – Vol. 13, № 9. – P. e18211. <https://doi.org/10.7759/cureus.18211>.

E.V. Martischenkova, N.D. Puzan, G.Z. Gutseva, I.A. Cheshik

THE RESULTS OF THE SURVEY OF RESPONDENTS OF THE GOMEL AND VITEBSK REGIONS REGARDING THE MOST COMMONLY USED DEVICES (TYPES OF COMMUNICATION) IN EVERYDAY LIFE

Research shows that the current level of knowledge and awareness about the nature of radio frequency electromagnetic fields and their impact on the environment and human health is low, and therefore there is a critical and urgent need to educate the public on this issue.

In order to further develop methodological support for socio-psychological rehabilitation and adaptation of the population to the conditions of ionizing and non-ionizing radiation, a sociological study was conducted in the Gomel (radionuclide-contaminated territory) and Vitebsk (conditionally clean territory) regions, during which the opinion of residents was studied as to which devices (types of communication) they and their family members use in everyday life, and also revealed self-assessments of the population of their knowledge in the safe use of various technical devices and types of communication.

The sociological survey was conducted in February-March 2022 among various population groups of the Gomel and Vitebsk regions (N=1180, $\Delta=\pm 4,0\%$ with a confidence probability of 95,0%), identified by type of settlement (city/village), gender (male/female), age (16-29 years, 30-49 years, 50 years and older), the level of education (basic/general secondary; vocational-technical/secondary-specialized; higher) and the type of employment (student, student; working; non-working pensioner; working pensioner; running a household; entrepreneur, farmer, self-employed; unemployed). The research methodology is the systematization and generalization of the data obtained during the sociological survey.

It was revealed that the vast majority of respondents, regardless of gender, age, level of education and place of residence (city / village), use a fairly extensive list of devices (types of communication). With general similar trends in the use of various devices (types of communication), respondents in the Vitebsk region more often than in the Gomel region use remote monitoring, surveillance, and control devices, but in the Gomel region – more often use mobile phone without Internet access, as well as mobile communication of standard 4G.

At the same time, a significant part of the respondents of the studied regions are not fully aware that with improper use (distance from a person during operation, operating time, etc.), various devices (types of communication) can have a negative impact on human health.

Key words: *electromagnetic field, sources of electromagnetic radiation, mobile communication of GSM, 3G, LTE, 5G standards, sociological survey, assessments and opinions of the population*

Поступила 11.09.2024

МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОБИЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

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

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

Разработана новая методология экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории, отличающаяся набором новых методов оценки основных параметров радиационной обстановки, объединенных общей целью, новыми едиными подходом и принципами. Цель ее разработки — обеспечить оценку *in situ* плотности загрязнения территории, объемной активности приземного слоя атмосферы, активности источников γ -излучения и вклада различных радионуклидов в AMBIENTНЫЙ эквивалент мощности дозы в условиях радиологической аварии. Методология направлена на извлечение максимума информации об уровнях загрязнения указанных объектов из аппаратурной линии γ -спектра. И основана на новых принципах: получение всей необходимой исходной информации и результатов оценки *in situ*, оперативно и без выхода персонала на загрязненную территорию из защищенного салона транспортного средства. Разработаны и внедрены методические рекомендации для выполнения независимой экспресс-оценки радиационной обстановки в зоне воздействия объектов использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения с применением мобильной лаборатории радиационного контроля.

Ключевые слова: методология, активность, источник, γ -спектрометр, *in-situ*

Введение

Методология независимой экспресс-оценки радиационной обстановки в зоне воздействия объектов использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения с применением мобильной лаборатории радиационного контроля (далее — МЛРК) разработана в рамках подпрограммы «Научное обеспечение эффективной и безопасной работы Белорусской атомной электростанции и перспективных направлений развития атомной энергетики» Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы (Мероприятие 13 «Выполнение работ по оказанию научно-технической поддержки Министерству по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности») и представлена в методических рекомендациях для выполнения независимой экспресс-оценки радиационной обстанов-

ки в зоне воздействия объектов использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения (далее — Методические рекомендации).

В комплекте с мобильными лабораториями для проведения радиационного контроля обычно поставляется эксплуатационная документация, включающая порядок проведения оценки радиационной обстановки и анализа полученных данных [1]. В документах, как правило, подробно изложены организационные аспекты использования и обслуживания мобильных лабораторий, приводятся рекомендуемая организационная структура эксплуатирующего подразделения, функциональные обязанности персонала, список терминов и определений, формы для регистрации результатов проведенных измерений и контроля качества оборудования, программного обеспечения. Приведенные подходы и методы выполнения измерений соответ-

ствуют рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (далее — МАГАТЭ) [2] и учтены авторами [3, 4]. Указанные «традиционные» методы выполнения измерений были апробированы и проанализированы. В результате выявлен ряд существенных недостатков.

Цель исследования — разработать новую методологию проведения независимой экспресс-оценки радиационной обстановки в зоне воздействия объектов использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения с применением МЛРК.

Материал и методы исследования

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

МЛРК представляет собой программно-аппаратный комплекс спектрометрического оборудования, размещенный на базе автомобиля. В исследованиях использовалась мобильная лаборатория, 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, помещенными в свинцовые коллиматоры толщиной 5 см, а также переносным γ -спектрометром высокого разрешения с полупроводниковым детектором.

Результаты исследования

В результате проведенных исследований предложен подход, позволяющий исключить недостатки традиционных методов и получить количественные характеристики основных радиационных параметров *in-situ* с приемлемой неопределенностью. Подход апробирован 36 лет назад для измерения параметра, наиболее важного для построения долгосрочных прогнозов радиационной обстановки, — плотности загрязнения территории [5, 6]. Соответствующая методика картирования и измерения

плотности загрязнения γ -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 имени Курчатова, г. Москва).

Указанный подход развит при разработке новой методологии *in-situ* измерений без отбора проб для оценки основных параметров радиационной обстановки — плотности загрязнения территории (Бк·м⁻²), активности источников γ -излучения (Бк), объемной активности приземного слоя атмосферы (Бк·м⁻³) и вклада различных радионуклидов в AMBIENTНЫЙ эквивалент мощности дозы (мкЗв·ч⁻¹) с применением мобильной лаборатории. Методические рекомендации, содержащие описываемую методологию, разработаны в соответствии с базовыми принципами и подходами, приведенными в рекомендациях МАГАТЭ [2, 7-9].

Установлено, что основными недостатками методов измерений, рекомендуемых для использования при оценке параметров радиационной обстановки, в том числе с использованием мобильных лабораторий [1, 2], являются:

- автоматически не учитывается распределение радионуклидов по профилю почвы при оценке плотности загрязнения территории (Бк·м⁻²) *in-situ*. Соответственно, при движении мобильной лаборатории средняя плотность загрязнения не определяется. Предполагается, что радионуклиды по профилю почвы могут быть распределены либо экспоненциально, либо равномерно. Масштабные работы по картированию территории, загрязненной в результате аварии на Чернобыльской АЭС, показали [5], что оператор не может знать, как на данном участке территории радионуклиды распределены по профилю почвы. Даже во время выпадений на указанной территории проводились

- агротехнические и строительные операции. В дальнейшем — защитные мероприятия и другие события, нарушающие верхний пахотный горизонт почвы. Этот факт всячески затушевывается, несмотря на то, что может приводить к ошибкам измерения на порядок величины;
- объемная активность воздуха определяется путем отбора проб аэрозолей воздуха с последующей спектрометрией фильтров. В полевых условиях γ -спектрометрическим методом установить активность, осажденную на фильтре, возможно только в узком диапазоне уровней загрязнения приземного слоя атмосферы: при низких и высоких уровнях загрязнения воздуха соотношение полезного сигнала к фону, соответственно — от природных источников и окружающей атмосферы, не позволяет получить результат с приемлемой неопределенностью. Установить надежную свинцовую защиту для блока детектирования в автомобиль проблематично. Кроме того, при нахождении МЛРК в радиоактивном облаке не представляется возможным обеспечить достаточную герметичность отсека, в котором установлен детектор. Поэтому фильтры с отобранными пробами аэрозолей обычно необходимо доставлять в лабораторию, где и проводятся измерения;
 - *in situ* устанавливается только изотопный состав источников γ -излучения, количественно их активности в полевых условиях не определяются. Предназначенное для таких расчетов программное обеспечение поставляется с γ -спектрометрическими комплексами опционально и в условиях внешнего санкционного давления на Беларусь недоступно. Кроме того, область его применения ограничена;
 - не предусмотрена оценка *in situ* парциального вклада различных радионуклидов в мощность дозы внешнего облучения, что не позволяет оперативно прогнозировать ее динамику в аварийных условиях. Кроме того, в острый период аварии исключительно важно располагать информацией о вкладах, например, ^{131}I и ^{137}Cs , чтобы оценить долю короткоживущих радионуклидов, в основном инертных радиоактивных газов;
 - зонирование *in situ*, т.е. картирование территории по уровням радиоактивного загрязнения в целях принятия решений о защитных мерах и построения долгосрочных прогнозов радиационной обстановки, должно проводиться по плотности загрязнения территории, однако в силу перечисленных выше причин проводится только по показаниям дозиметра.
- Таким образом, в подавляющем большинстве возможных чрезвычайных ситуаций с ионизирующим излучением не исключается процедура отбора проб, а значит — выхода персонала из автомобиля в условиях радиационной аварии с разгерметизацией защищенного салона с очищенным воздухом. Результаты лабораторных испытаний отобранных проб доступны спустя нескольких часов или суток после доставки проб в аккредитованную лабораторию, подготовки проб к анализу и выполнения измерений, зачастую весьма затратных. Кроме того, исключается возможность оперативно перепроверить результаты измерений, более детально изучить участок территории, на которой выявлен высокий градиент значений параметров радиационной обстановки.
- Предлагаемая ниже методология экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории радиационного контроля, в том числе в зоне воздействия объектов использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения, включает набор методов оцен-

ки основных параметров радиационной обстановки, объединенных общей целью, едиными подходом и принципами.

Целью является количественная оценка и оперативный прогноз радиационной безопасности исследуемой территории в условиях радиологической аварии. Общим подходом является извлечение максимума информации об уровнях загрязнения окружающей среды из аппаратурной линии спектра, общими принципами — получение исходной информации и результатов оценки *in situ*, т.е. в полевых условиях на месте проведения набора спектра, оперативно (в течение нескольких минут) и, при возможности, под защитой бортовых систем жизнеобеспечения.

Набор компьютерно-ориентированных методов экспресс-оценки включает расчет по аппаратурной линии бортовых блоков детектирования γ -излучения плотности загрязнения территории ($\text{Бк}\cdot\text{м}^{-2}$), активности источников γ -излучения (Бк), объемной активности приземного слоя атмосферы ($\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$) и вклада различных радионуклидов в AMBIENTНЫЙ эквивалент мощности дозы ($\text{мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}$). Для обеспечения оперативности получения результатов все расчеты автоматизированы путем разработки специального программного обеспечения. Необходимость отбора проб в условиях радиологической аварии устранена. При этом возможности бортового измерительного оборудования должны использоваться максимально.

Для удовлетворения перечисленных требований к измерениям активности источников с различной геометрией, значения соответствующих калибровочных факторов, или при известных эффективностях регистрации, геометрических факторов, должны быть предварительно определены. Это возможно, так как любой загрязненный радионуклидами объект можно представить в виде точечных источников, в общем случае неравномерно распределенных по его объему. При измерениях *in situ* и энергиях γ -квантов более 40 кэВ всегда имеется возможность расположить кристалл блока детектирования таким образом относительно источников, чтобы поле

γ -излучения внутри кристалла можно было считать равномерным.

Флюенс фотонов будет пропорционален числу частиц, приходящих от источника через элементарную (единичную) площадку, центр которой находится в объеме кристалла блока детектирования. При этом площадка должна быть расположена перпендикулярно к регистрируемым фотонам. Если элементарная площадка имеет форму диска, то его окружность при различных ориентациях диска опишет элементарную полусферу. Распространение излучения от одного точечного источника можно описать с помощью расстояния до источника r и телесного угла $d\Omega$ в направлении его расположения (единичного вектора) Ω (рисунок 1).

Если проинтегрировать дифференциальное энергетическое и угловое распределение флюенса фотонов $F(r, E, \vartheta, \varphi)$ с энергией в интервале $E \div E+dE$, пересекающих перпендикулярно расположенную элементарную площадку, по объему загрязненного радионуклидами объекта, то получим энергетическое распределение флюенса частиц.

Например, если проинтегрировать $F(r, E, \vartheta, \varphi)$ по полупространству, то получим энергетическое распределение флюенса частиц от приземного слоя атмосферы, окружающего мобильную лабораторию радиационного контроля или переносной блок детектирования:

$$F(E) = \iiint_{000}^{\infty\pi\pi} F(r, E, \vartheta, \varphi) dr d\vartheta d\varphi, \quad (1)$$

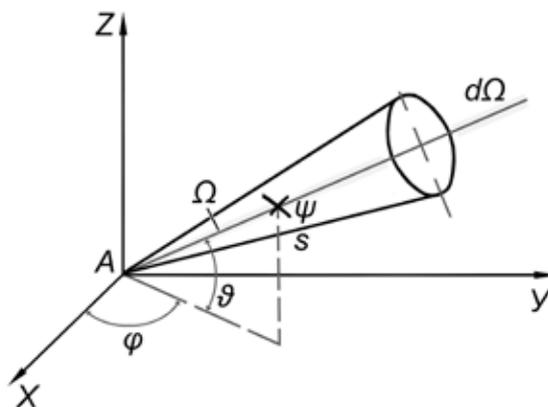


Рисунок 1 — Поле излучения от точечного источника

В заданном поглощающем изотропном полупространстве дифференциальное распределение $F(r, E, \vartheta, \varphi)$ не зависит от углов и обратно пропорционально квадрату расстояния до источника:

$$F(r, E, \vartheta, \varphi) = \frac{\eta_e \cdot A_v}{r^2} \cdot T \cdot e^{-\mu_a(E) \cdot r}, \quad (2)$$

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

η_e — квантовый выход при рассматриваемой энергии;

T — продолжительность экспозиции, с;

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

Если проинтегрировать выражение (1), учитывая (2), то получим энергетическое распределение флюенса нерассеянных γ -квантов от воздуха приземного слоя атмосферы, загрязненного радионуклидами:

$$F(E) = \iiint_{0 \ 0 \ 0}^{\infty \ \pi \ \pi} \left\{ \frac{\eta_e \cdot A_v}{r^2} \cdot T \cdot e^{-\mu_a(E) \cdot r} \right\} \cdot dr d\vartheta d\varphi = 2\pi \cdot \frac{\eta_e \cdot A_v}{\mu_a} \cdot T, \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что объемная активность равна

$$A_v = \frac{\mu_a \cdot F(E)}{2\pi \cdot \eta_e \cdot T}, \quad (4)$$

В энергетическом диапазоне от 40 до 3000 кэВ распределение флюенса как рассеянных, так и нерассеянных γ -квантов, мож-

но увидеть в виде аппаратной линии спектра на экране γ -спектрометра. Известные искажения в форму кривой флюенса вносятся лишь разрешением и эффективностью регистрации неидеального блока детектирования (рисунок 2). В γ -спектрометрии известно, что флюенс $F(E)$ пропорционален интегралу по аппаратной линии спектра в области энергий $(E-dE, E+dE)$, где величина $dE(E)$ определяется разрешением блока детектирования при энергии E .

На аппаратной линии спектра (рисунок 2) видны фотопики полного поглощения фотонов, расположенные на постаменте, сформированном частицами, рассеянными по пути следования к детектору и в самом детекторе.

Интерес в данном случае представляет только «чистая» площадь фотопика, т.е. интеграл за вычетом площади под пиком, так как она пропорциональна флюенсу нерассеянных γ -квантов и объему детектора:

$$F(E) = \frac{N_{i,0}}{\varepsilon_i(E) \cdot V}, \quad (5)$$

где: $N_{i,0}$ — «чистая» площадь 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 зна-

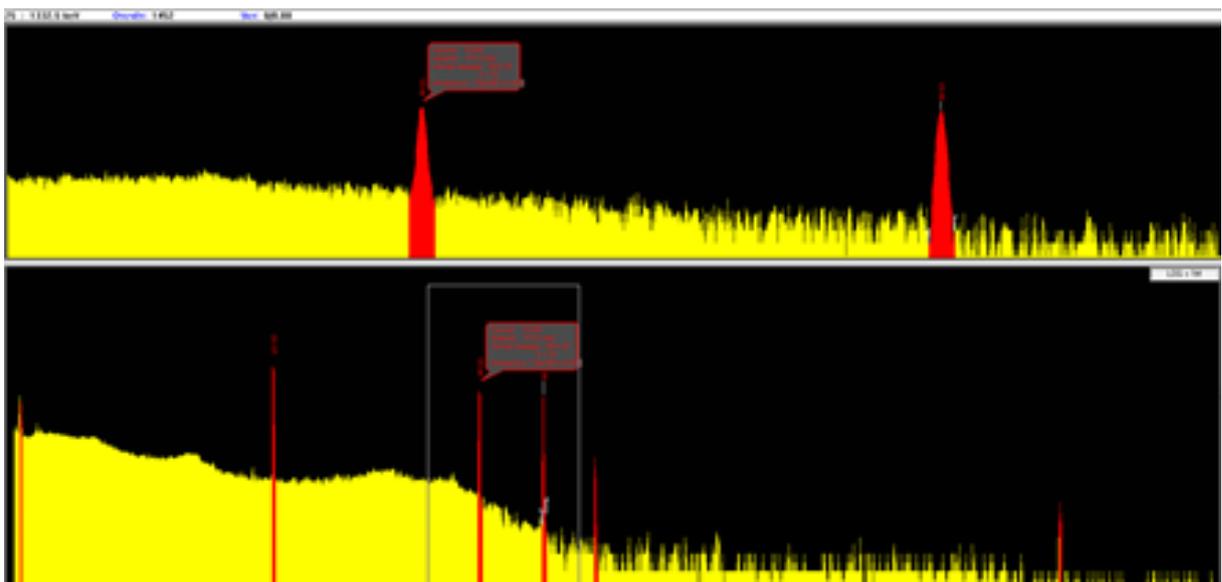


Рисунок 2 — Аппаратурная линия γ -спектра полупроводникового блока детектирования от точечных источников ^{137}Cs и ^{60}Co , природных радионуклидов

чение «постамент», т.е. площади «трапеции», над которой расположен фотопик);

$\varepsilon_i(E)$ — эффективность регистрации материала кристалла блока детектирования, м³;

V — объем кристалла блока детектирования, м³.

Подставляя выражение (5) в (4), получим расчетную формулу для оценки объемной активности воздуха приземного слоя атмосферы:

$$A_v = \frac{\mu_a \cdot N_{i,0}}{2\pi \cdot \eta_e \cdot \varepsilon_i(E) \cdot V \cdot T}, \quad (6)$$

Методы измерений плотности загрязнения территории и активности источников приведены в [10] и [11] соответственно. В γ -спектрометрии при расчёте активности источника, в том числе объемной активности и плотности поверхностного загрязнения, принято использовать калибровочный фактор (коэффициент):

$$A_i = c_i \cdot \frac{(N_{i,0} - N_{i,p})}{T}, \quad (7)$$

где: A_i — загрязнение объекта i -ым радионуклидом, Бк, Бк·м⁻³ или Бк·м⁻²;

c_i — калибровочный фактор соответствующей размерности;

$N_{i,p}$ — 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 приземного слоя атмосферы и территории, а также определения активности обнаруженных источников ионизирующего излучения, значение $N_{i,p}$ в выражении (7) всегда равно нулю. Доаварийный уровень загрязнения объектов указанным радионуклидом априори неизвестен и при расчётах считается ничтожно малым.

Сравнивая выражение (6), полученное теоретически, с выражением (7), принятым в практике γ -спектрометрии, можно заключить, что в общем случае при оценке загрязнения объекта i -ым радионуклидом по одной γ -линии калибровочный фактор c_i равен обратной величине произведения квантового выхода η_e , внутренней эффективности регистрации детектора $\varepsilon(E)$ при энергии указанных фотонов, а также гео-

метрического 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:

$$c_i = \frac{1}{\eta_e \cdot \varepsilon(E) \cdot g_i(E)}, \quad (8)$$

Таким образом, для того, чтобы измерять активности источников, необходимо предварительно определить значение соответствующего калибровочного фактора, или, при известной эффективности регистрации, геометрического фактора. В γ -спектрометрии процедура определения $\varepsilon(E)$ называется калибровкой блока детектирования по эффективности регистрации и проводится, как правило, при $g_i(E)=1$. Процедура определения $g_i(E)$ при известной $\varepsilon(E)$ называется определением поправочного коэффициента на геометрию источника.

В рамках исследований были разработаны и внедрены Методические рекомендации, где в соответствующих главах предлагаются методы определения калибровочных и геометрических факторов для оценки уровней загрязнения различных объектов. Методические рекомендации включают порядок действий персонала МЛРК при калибровках блоков детектирования для измерений *in-situ* плотности загрязнения радионуклидами приземного слоя атмосферы и территории, а также определения активности обнаруженных источников ионизирующего излучения.

В большинстве случаев основными дозоформирующими радионуклидами в выбросе являются γ -излучатели, что позволяет использовать полевые (*in-situ*) методы экспресс-оценки с точностью, вполне приемлемой для поставленных целей. Достоверность оценки средних значений при этом выше, так как смягчаются эффекты как рельефа местности, приводящие к неопределённости скорости осаждения радионуклидов, так и микрорельефа почвы, при-

водящие к значительной дисперсии результатов анализа проб, отобранных буром [12].

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

Заключение

Разработаны Методические рекомендации для выполнения экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории радиационного контроля, которые являются дополнением к эксплуатационной документации, поставляемой в комплекте с указанным оборудованием. Методические рекомендации предназначены для использования специалистами в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, эксплуатирующими мобильную лабораторию радиационного контроля при проведении независимой экспресс-оценки радиационной обстановки в зоне воздействия объектов использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения с применением указанного оборудования.

Методические рекомендации отличаются от «штатной» документации тем, что построены на новой методологии экспресс-оценки, характеризующейся набором новых методов оценки основных параметров радиационной обстановки, объединенных общей целью, новыми едиными подходом и принципами. Целью разработки новой методологии являлась количественная оценка и оперативный прогноз радиационной безопасности исследуемой территории в условиях радиологической аварии. Методология направлена на извлечение максимума информации об уровнях загрязнения окружающей среды и активности источников ионизирующего излуче-

ния из аппаратурной линии γ -спектра. Методология основана на новых принципах: получении всей необходимой исходной информации и результатов оценки *in situ*, оперативно и без выхода персонала на загрязненную территорию из защищенного салона транспортного средства.

Набор новых компьютерно-ориентированных методов экспресс-оценки включает расчет по аппаратурной линии бортовых блоков детектирования γ -излучения: плотности загрязнения территории, активности источников γ -излучения, объемной активности приземного слоя атмосферы и вклада различных радионуклидов в AMBIENT эквивалент мощности дозы. Для обеспечения оперативности получения результатов все расчеты автоматизированы путем разработки специального программного обеспечения. Максимально использованы возможности бортового оборудования, что позволяет устранить необходимость отбора проб в условиях радиологической аварии.

Новая методология, разработанные методические рекомендации и программное обеспечение позволяют выполнять измерения перечисленных выше параметров радиационной обстановки в соответствии с критериями оценки радиационного воздействия, установленными Гигиеническим нормативом, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь 25.01.2021 №37. Разработанные методы измерений обеспечивают проведение оперативного радиационного контроля в случае возникновения нештатных ситуаций радиационного характера и уточнение радиационной обстановки в соответствии с требованиями к проведению измерений с учетом фазы аварии, установленными Нормами и правилами по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность атомных электростанций в случае ядерной и (или) радиологической аварийной ситуации. Требования к планированию и обеспечению радиационного мониторинга», утвержденными постановлением МЧС Республики Беларусь 12.04.2017 №11. Работа выполнена с уче-

том международно-признанных подходов в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Библиографический указатель

1. Procedures for Using the Belarusian Mobile Radiation Monitoring Laboratory. Work report of Component E. Prepared by SSTC NRS. Final technical editing by J. Lahtinen (STUK), 3.10.2019. – RISKAUDIT, EU, 2019. – 60 p.

2. Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях / Международное агентство по атомной энергии IAEA-TECDOC-1092/R. – Вена, 2002. – 311 с.

3. 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.

4. 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.

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. 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.

7. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности, часть 3 / Международное агентство по атомной энергии № GSR Part 3. – Вена, 2015. – 477 с.

8. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment / IAEA Safety Reports Series No.19. Vienna: IAEA, 2001. – 229 p.

9. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring / IAEA Safety Reports Series No. 64. – Vienna: IAEA, 2010. – 232 p.

10. Нилова, Е.К. Геометрический фактор для оценки плотности загрязнения почвы *in-situ* / Е.К. Нилова, К.Н. Буздалкин // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – № 2(30). – 2023. – С.54-61.

11. Нилова, Е.К. Оценка активности удаленных источников γ -излучения / Е.К. Нилова, К.Н. Буздалкин, В.Л. Самсонов // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – № 1(31). – 2024. – С.55-61.

12. 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.

Е.К. Nilova, K.N. Buzdalkin

METHODOLOGY FOR EXPRESS ASSESSMENT OF THE RADIATION SITUATION USING A MOBILE LABORATORY

A new methodology for express assessment of the radiation situation using a mobile laboratory has been developed. It characterized by a set of new methods for assessing the main parameters of the radiation situation, united by a common goal, new unified approach and principles. The purpose of developing the new methodology was to ensure *in-situ* assessment of the density of contamination of the territory, the volumetric activity of the surface layer of the atmosphere, the activity of gamma radiation sources and the contribution of various radionuclides to the ambient equivalent of dose rate under conditions of a radiological accident. The methodology is aimed at extracting maximum information about the contamination levels of specified objects from the instrument line of the gamma spectrum. The methodology is based on new principles – on obtaining all the necessary initial information and *in situ* assessment results, promptly and without personnel entering to the contaminated area from the protected interior of the vehicle. Methodological recommendations have been developed and implemented to perform an independent express assessment of the radiation situation in the area of exposure to nuclear facilities and ionizing radiation sources using a mobile radiation monitoring laboratory.

Key words: methodology, activity, source, gamma-ray spectrometer, *in-situ*

Поступила 20.08.2024