УДК 504.064
doi: https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-3-80-87

МОДЕЛЬ ЗОНЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАРАЖЕНИЯ: ПРОГНОЗНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

*[1]А. В. Вилков, [1]Ю. П. Кузьмин, [1]М. Ю. Лебедев, [3]Е. В. Макейкин, [1]А. Ф. Найданов, [1]И. В. Свитнев, [2]Е. А. Харитонова**

[1]Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
[3] 27-й Научный центр Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ. В условиях современных угроз и опасностей важнейшей ценностью населения остается здоровье. Здоровье – это основа человеческого потенциала, залог благополучия и устойчивого развития общества. На сегодняшний день одной из внешних опасностей является растущая угроза глобального терроризма, в арсенале которого имеются современные образцы вооружения, в том числе содержащие радиоактивные вещества. В статье описан процесс формирования зоны радиоактивного заражения (РЗ) местности при применении радиологического оружия, что, безусловно, влияет на здоровье населения в зоне поражения.
ЦЕЛЬ. Разработать модель формирования зоны РЗ при применении радиологического оружия или чрезвычайной ситуации, связанной с нарушением правил радиационной или ядерной безопасности, в том числе и на радиационно опасных объектах Военно-Морского Флота Российской Федерации.
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В основе методики лежит создание двухэтапной модели РЗ местности. В результате математических вычислений получена модель, позволяющая определить пространственные характеристики распределения мощности дозы излучения и спрогнозировать последствия радиационного воздействия на объекты.
РЕЗУЛЬТАТЫ. С помощью этой модели появляется возможность оценить степень влияния ионизирующего излучения на здоровье людей, находящихся в зоне РЗ.
ОБСУЖДЕНИЕ. Предлагаемая модель формирования зоны РЗ, в отличие от других, позволяет определить пространственные характеристики распределения мощности дозы в случае применения радиоактивных веществ в террористических целях.
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Рассмотренная математическая модель формирования зоны РЗ при применении радиологического оружия или при чрезвычайных ситуациях техногенного характера, а также проявлениях диверсионных действий на радиационно опасных объектах флота позволяет определить пространственные характеристики распределения мощности дозы излучения и спрогнозировать последствия радиационного воздействия на объекты и, в первую очередь, на население, находящееся на радиоактивно зараженной местности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морская медицина, «радиологическое оружие», радиационная безопасность на объектах Военно-Морского Флота Российской Федерации, модель, мощность дозы излучения, радиоактивные вещества, радиоактивное заражение, здоровье

***Для корреспонденции:** *Харитонова Елена Александровна, e-mail: xaritonova_ea@mail.ru*
***For correspondence:** *Elena A. Kharitonova, e-mail: xaritonova_ea@mail.ru*

Для цитирования: Вилков А. В., Кузьмин Ю. П., Лебедев М. Ю., Макейкин Е. В., Найданов А. Ф., Свитнев И. В., Харитонова Е. А. Модель зоны радиоактивного заражения: прогнозное исследование // *Морская медицина.* 2024. Т. 10, № 3. С. 80–87, doi: https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-3-80-87, EDN: https://elibrary.ru/LBOLWU
For citation: Vilkov A. V., Kuz'min J. P., Lebedev M. U., Makeykin E. V., Naydanov F. A., Svitnev I. V., Kharitonova E. A. Model of zone formation of radioactive contamination: predictive study // *Marine medicine.* 2024. Vol. 10, No. 3. P. 80–87, doi: https://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-3-80-87 EDN: https://elibrary.ru/LBOLWU

© Авторы, 2024. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства». Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа» в соответствии с лицензией CCBY-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru

MODEL OF ZONE FORMATION OF RADIOACTIVE CONTAMINATION: PREDICTIVE STUDY

[1]*Alexey V. Vilkov,* [1]*Jurij P. Kuz'min,* [1]*Mikhail U. Lebedev,* [3]*Evgeniy V. Makeykin,*
[1]*Alexander F. Najdanov,* [1]*Igor V. Svitnev* [2]*Elena A. Kharitonova*
[1]Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia
[2]Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
[3] 27th Scientific Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow Russia

INTRODUCTION. In the face of modern threats and hazards health remains the most important value for people. Health is the basis of human potential, the key to prosperity and sustainable development of the society. Nowadays increasing threats of global terrorism are one of external hazards, which have modern models of weapons, including the ones with radioactive material in their arsenal. The article describes the process of forming the zone of radioactive contamination (RC) of the terrain in case of radiological weapon use that obviously impacts on public health in the affected area.
OBJECTIVE. Develop the model for forming the zone of RC in case of radiological weapon use or emergency situation, associated with violation of the rules for nuclear or radiation safety, including radiation hazardous facilities of the Russian Federation Navy.
MATERIALS AND METHODS. The method is based on creating a two-stage model of RC of the terrain. Mathematical calculations have resulted in a model allowing to determine spatial characteristics of radiation dose rate and to predict the consequences of radiation exposure to objects.
RESULTS. The model makes it possible to evaluate the extent of radiation ionizing effect on human health in the zone of RC.
DISCUSSION. The proposed model for forming the zone of RC, unlike others, allows to determine spatial characteristics of dose rate distribution in case of radioactive substance use for terroristic purposes.
CONCLUSION. The mathematical model for formind the zone of RC in case of radiological weapon use or emergency situations of technogenic nature as well as acts of sabotage at radiation-hazardous facilities of the Navy allows to determine spatial characteristics of radiation dose rate distribution and to predict the consequences of radiation exposure to objects and primarily to the population in radioactively contaminated areas.

KEYWORDS: marine medicine, "radiological weapon", radiation safety at the facilities oft he Russian Federation Navy, model, radiation dose rate, radioactive material, radioactive contamination, health

Введение. В условиях современных угроз и опасностей одной из важнейших ценностей населения остается здоровье[1] [1]. Здоровье – это основа человеческого потенциала, залог благополучия и устойчивого развития общества. К сожалению, участившиеся в последние годы диверсионно-террористические атаки, эскалация вооруженных конфликтов прямо и косвенно влияют на состояние здоровья населения. В связи с этим в современных условиях поддержание мира и обеспечение международной безопасности имеют первостепенное значение [2]. Слабая способность государств поодиночке эффективно бороться с международной эскалацией несанкционированных действий, предотвращать возникновение вооруженных конфликтов, содействовать поддержанию мира и стабильности в кризисных регионах оказывает важнейшее воздействие на уровень здоровья населения, что, в свою очередь, влияет на устойчивое развитие мирового сообщества [3].

На сегодняшний день одной из внешних опасностей является растущая угроза глобальных ядерных и радиационных диверсий и новые формы их проявления. Современные диверсионно-террористические организации (различные международные частные военные компании) представляют собой мощные развитые структуры, на вооружении которых стоят современные образцы вооружения и военной техники и новейшие технологии преодоления физической защиты радиационно и ядерно опасных объектов. Численность их и методология операций постоянно растут. Масштабы действий данных организаций позволяют говорить, что угроза диверсионно-террористического применения радиоактивных веществ (РВ), способная нанести вред Российской Федерации (РФ), будет возрастать, а значит и негативное влияние на здоровье населения будет увеличиваться.

При рассмотрении наиболее вероятных сценариев применения РВ в указанных целях,

[1]Свитнев И.В., Харитонова Е.А. Первая помощь в условиях реализации современных террористических угроз. Радиационные, химические и биологические аспекты. М., Изд. Кнорус, 2022, 122 с.

на наш взгляд, наиболее реалистичным является изготовление так называемого радиологического оружия либо применение РВ в замаскированной под человеческий фактор техногенной катастрофы. Если мы рассмотрим всем набившее оскомину радиологическое оружие, то оно представляет собой начиненное РВ взрывное устройство [4]. При его детонации происходит заражение как места взрыва, так и более обширной площади. Местное заражение вызывают выброшенные РВ. Сложнее с моделированием операций по «случайной техногенной катастрофе в силу человеческого фактора». Данная модель уместна при рассмотрении нештатной ситуации в зонах утилизации или обслуживания кораблей, судов атомного флота. Принципы выявления и оценки радиационной ситуации и подходы к ней аналогичны.

Расширение площади заражения связано с распространением радионуклидов и увеличением плотности загрязнения РВ. В отличие от применения ядерного оружия или аварий (разрушений) объектов атомной энергетики, где формируются достаточно протяженные зоны радиоактивного заражения (РЗ), применение РВ будет носить локальный характер, но при этом характеристики зон заражения будут абсолютно идентичны первым двум случаям. Сценарий формирования РЗ при диверсии на радиационно опасном объекте Военно-Морского Флота Российского Федерации (ВМФ РФ) (судах атомного флота РФ) похож, но отличается масштабностью и особенностью метеоусловий в прибрежных зонах, особенно в осенне-зимний период. Мощность дозы излучения при распространении РВ будет зависеть от радиуса разлета радионуклидов, активности изотопов и энергетических характеристик источников радиационной угрозы.

Цель. Разработать модель формирования зоны РЗ при применении радиологического оружия или чрезвычайных ситуаций техногенного характера, а также изучить проявления диверсионных действий на радиационно опасных объектах.

Материалы и методы. Разработка модели РЗ представляет собой два этапа: на 1-м этапе моделируется разлет РВ; на 2-м – поле излучения от точечных источников с пятна загрязнения.

Для этого необходимы следующие исходные данные:

$M_{вв}$ – масса взрывчатого вещества (ВВ), кг;

$m_{рв}$ – масса РВ, кг;

$A_{рв}$ – активность радиоактивных веществ, Бк;

E_γ – энергия гамма-квантов, характерная для примененного изотопа, МэВ.

Радиус разлета РВ зависит от начальной скорости радиоактивных элементов V_0, которую можно рассчитать по следующей формуле [5]:

$$V_0 = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{2+\beta}}, \quad \beta = \frac{M_{вв}}{m_{рв}}, \qquad (1)$$

где D – скорость детонации, $D \approx 3{,}5\sqrt{Q}$в, м/с; $Q_в$ – теплота взрыва, кДж.

При использовании формулы (1) сделано допущение, что форма взрывного устройства цилиндрическая, без оболочки, при этом РВ расположены на поверхности объема ВВ таким образом, что вместо массы оболочки используется масса РВ.

Зная V_0, можно рассчитать радиус разлета РВ $R_{рв}$ по формуле [2][3]:

$$R_{рв} = 2 \cdot V_0 \cdot \sqrt{\frac{H}{g}}, \qquad (2)$$

где H – высота взрыва, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

При моделировании разлета РВ принято допущение, что все радиоактивные элементы разлетаются изотропно на максимальное расстояние. При таком допущении создается пятно с радиусом $R_{рв}$ и равномерной плотностью РЗ $a_{рз}$, которую можно рассчитать по следующей формуле [4]:

$$a_{рз} = \frac{A_{рв}}{\pi R_{рв}^2}, \qquad (3)$$

В свою очередь, активность $A_{рв}$ – есть функция от массы РВ, которая зависит от изотропного состава. Тогда $A_{рв}$ будет равно согласно формуле [6]:

$$A_{рв} = \frac{4{,}17 \cdot 10^{23} \cdot m_{рв}}{A \cdot T_{1/2}}, \qquad (4)$$

где A – атомная масса изотопа, а.е.м.; $T_{1/2}$ – период полураспада радионуклида, годы.

Интенсивность гамма-излучения I_γ в точке, находящейся вне оси симметрии (рис. 1), определяется из соотношения [7]:

$$I_\gamma = \iint \frac{q_и}{4\pi} \cdot \frac{\rho}{(h^2+\rho^2)} \cdot e^{\left(-\mu \sqrt{h^2+\rho^2}\right)} d\rho d\psi, \quad (5)$$

где $q_И$ – мощность точечных изотропных источников, $q_И = a_{рз} \cdot E_\gamma$, МэВ; μ – линейный ко-

[2]Свитнев И.Е., Свитнев В.Е., Хмелёв В.Е. Современные террористические угрозы, чрезвычайные ситуации и безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2009. 86 с.

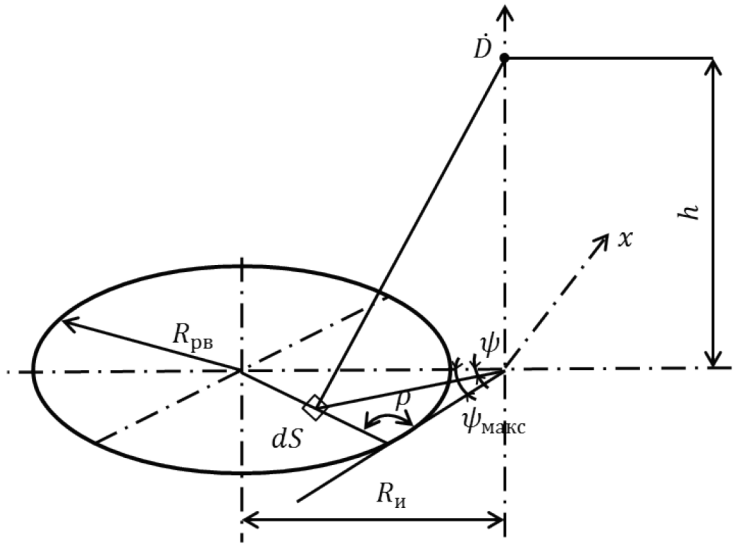

Рис. 1. Интенсивность излучения в точке, находящейся вне оси симметрии
Fig. 1. Radiation intensity at a point located outside the axis of symmetry

эффициент ослабления гамма-излучения воздухом, см$^{-1}$.

Переменные интегрирования ψ и ρ изменяются в пределах:

$$0 \le \psi \le \psi_{макс} = \arcsin(R_{рв}/R_и); \quad (6)$$

$$R_и \cdot \cos\psi - \sqrt{R_{рв}^2 - R_и^2 \cdot \sin^2\psi} \le \rho \le R_и \cdot \cos\psi + \sqrt{R_{рв}^2 - R_и^2 \cdot \sin^2\psi}, \quad (7)$$

где $R_И$ – расстояние от центра взрыва до точки детектирования, м.[2]

Из формул (5) и (6) следует, что $I_\gamma = f(R_и), \frac{МэВ}{см^2 \cdot с}$.

Линейный коэффициент ослабления воздухом μ зависит от энергии гамма-кванта [6]. В этом случае для более точного расчета характеристик ионизирующего излучения используют уравнение переноса ионизирующих излучений, методы решения которого приведены в источнике [7]. Для приближенных расчетов на небольших расстояниях ослаблением гамма-квантов воздухом вообще пренебрегают. Однако в нашем случае мы имеем дело с распространением гамма-излучения в воздухе на большую глубину. Сделаем допущение, что воздух нормальной плотности, температурой 20 ^{0}С, а энергия гамма-квантов 1 МэВ, тогда $\mu \approx 7{,}7 \cdot 10^{-5} \frac{1}{см}$.

По интенсивности гамма-излучения можно определить количество энергии ΔЕ, передаваемое 1 см^3 воздуха в единицу времени:

$$\Delta E = I_\gamma \cdot (1 - e^{-\mu}) \quad (8)$$

Принимая среднюю энергию одной пары ионов равной 33,85 эВ, получаем энергетический эквивалент кулона на килограмм: $1 \frac{кл}{кг} = 2{,}73 \cdot 10^{14} МэВ/м^3$ [7].

Отсюда следует, что 1 Р (рентген) соответствует энергии $7{,}05 \cdot 10^4 \frac{МэВ}{см^3}$ в воздухе. Тогда получаем выражение для расчета мощности экспозиционной дозы $D_{эксп}$, Р/ч:

$$D_{эксп} = 3600 \cdot \frac{\Delta E}{7{,}05 \cdot 10^4}. \quad (9)$$

Результаты. Геометрическая модель формирования РЗ вследствие применения РВ в обсуждаемых целях представлена на рис. 2, из которого видно, что пятно радиоактивного загрязнения представляет собой радиус разлета РВ $R_{РВ}$, а пятно РЗ формируется за счет распространения ионизирующего излучения на расстояние $R_И$, соответствующее пороговому значению мощности дозы.

Под пороговым значением мощности дозы $D_{пор}$ нами понимается такое ее значение, при превышении которого может быть нанесен вред здоровью человека в результате облучения ионизирующим излучением. Исходя из допустимых значений доз облучения для населения, установленных СанПин 2.6.1.2523-09 (Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009), а также в соответствии с методическими указаниями по организации радиационного, химического и биологического наблюдения (разведки), пороговым значением мощности дозы, при котором осуществляется выявление источника заражения, является значение 50 мкР/час.

[3]Варющенко С. Б. Радиационная, химическая и биологическая защита/С. Б. Варющенко, П.Р. Гильванов, Д.Г. Колесов и др. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можай- ского, 2010. С. 454.

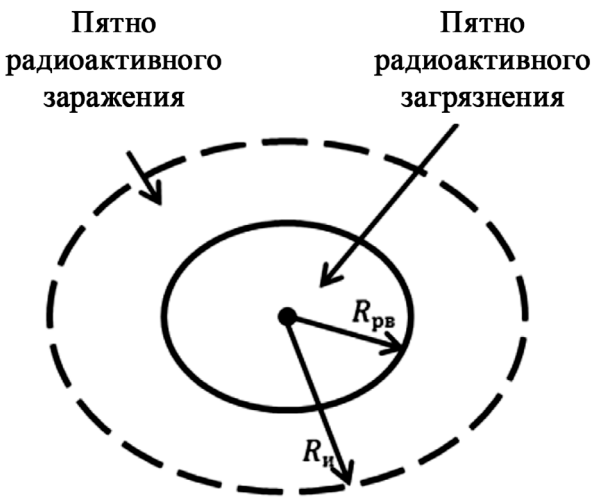

Рис. 2. Геометрическая модель формирования радиоактивного заражения
Fig. 2. Geometric model of the formation of radioactive contamination

Также в СанПин 2.6.1.2523-09 отмечено, что при регистрации мощности дозы радиоактивного излучения более 5 мкР/час принимается решение на оповещение о радиоактивном заражении для организации мероприятий, направленных на защиту от воздействия ионизирующего излучения. Необходимо заметить, что в различных открытых источниках Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) и Министерства обороны Российской Федерации нет четких правил по определению значения уровня радиации, при котором местность считается радиоактивно загрязненной (зараженной). Мы предлагаем оперировать нормами НРБ-99-2009, исходя из уровня плотности загрязнения, который следует рассчитывать через методологию оценки потоковых величин [8].

На основе разработанной модели формирования зоны РЗ был проведен расчет распределения мощности дозы на местности для следующих исходных данных: масса РВ – 0,1, 0,2, 0,3 кг; масса ВВ – 0,1 кг; энергия гама-кванта – 1 МэВ. На рис. 3 представлены графики зависимости мощности дозы от расстояния.

Из представленных графиков (см. рис. 3) видно, что при применении радиологического оружия или в случае чрезвычайных ситуаций техногенного характера на объектах флота, а также при проявлении диверсионных действий на радиационно опасных объектах, повышенный радиационный фон будет наблюдаться на расстоянии в сотни метров от границы пятна радиоактивного загрязнения [9].

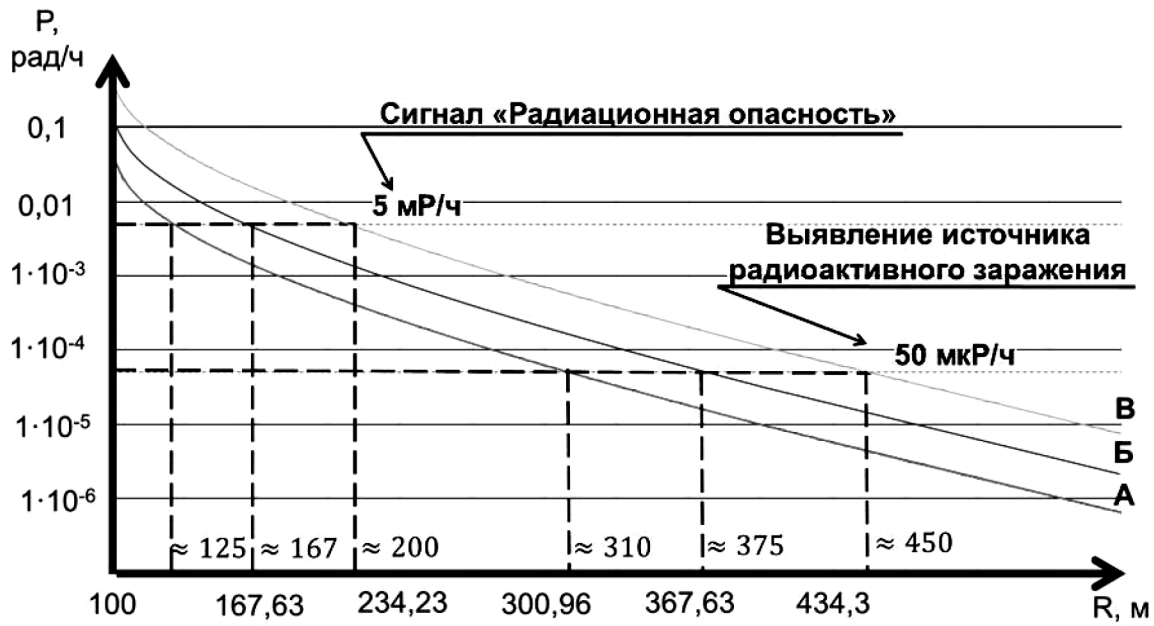

Рис. 3. Зависимость распределения мощности дозы от расстояния.
А – количество РВ 0,1 кг; Б – количество РВ 0,2 кг; В – количество РВ 0,3 кг
Fig. 3. Dependence of dose rate distribution on distance
A – quantity of RS 0.1 kg; Б – quantity of radioactive substances 0.2 kg; B – quantity of RS 0.3 kg

Обсуждение. В настоящее время существуют различные модели и методики по прогнозированию последствий применения ядерного оружия, аварий (разрушений) на радиационно опасных объектах, которые описывают основные процессы формирования зон РЗ [10]. Однако они не позволяют спрогнозировать зоны заражения вследствие применения радиоактивных веществ в террористических целях. В отличие от применения ядерного оружия или аварий (разрушений) объектов атомной энергетики, где формируются достаточно протяженные зоны РЗ, применение радиоактивных веществ будет носить локальный характер, но при этом характеристики зон заражения будут абсолютно идентичны первым двум случаям [11]. Мощность дозы излучения при применении радиоактивных веществ будет зависеть от радиуса разлета, активности и энергетических характеристик источников ионизирующего излучения. Предлагаемая модель формирования зоны РЗ, в отличие от других, позволяет определить пространственные характеристики распределения мощности дозы в случае применения радиоактивных веществ в террористических целях.

Заключение. Таким образом, рассмотренная математическая модель формирования зоны РЗ при применении радиологического оружия или чрезвычайных ситуаций техногенного характера, а также проявлений диверсионных действий на радиационно опасных объектах флота позволяет определить пространственные характеристики мощности дозы излучения и спрогнозировать последствия радиационного воздействия на объекты и в первую очередь на население, находящееся на радиоактивно зараженной местности. Кроме того, она позволит органам управления на основе проводимых расчетов сформировать мероприятия, направленные на совершенствование системы радиационного наблюдения объектов, а также своевременно предпринять меры для профилактики негативного влияния на здоровье людей и для минимизации возможных последствий радиационного поражения.

Сведения об авторах:

Вилков Алексей Владимирович – кандидат военных наук, преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского; 671432, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13; e-mail: leha_kostroma@mail.ru

Кузьмин Юрий Петрович – кандидат технических наук, преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского; 671432, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13; e-mail: kuzminosinka@gmail.com

Лебедев Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского; 671432, Санкт-Петербург, улица Ждановская 13, e-mail: lebedev.mIhall@yandex.ru

Макейкин Евгений Викторович – кандидат военных наук, старший научный сотрудник, 27-й Научный центр Министерства обороны Российской Федерации; 111024, Москва, проезд Энтузиастов, д. 19, стр. 20; e-mail: E.Makeykin2305@gmail.com

Найданов Александр Фотеевич – кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского; 671432, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13; e-mail: naydanov@bk.ru

Свитнев Игорь Владимирович – кандидат военных наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского; 671432, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13; e-mail: isvitnev@mail.ru

Харитонова Елена Александровна – кандидат медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой основ медицинских и специальных знаний, Санкт-Петербургский государственный университет; 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9; e-mail: xaritonova_ea@mail.ru

Information about the authors:

Aleksej V. Vilkov – Cand. of Sci. (Military), lecturer, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky; 671432, Saint Petersburg, Zhdanovskaya Str., 13; e-mail: leha_kostroma@mail.ru

Jurij P. Kuz'min – Cand. of Sci. (Tech.), lecturer, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky; 671432, Saint Petersburg, Zhdanovskaya Str., 13; e-mail: kuzminosinka@gmail.com

Mihail J. Lebedev – Cand. of Sci. (Tech.), lecturer, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky; 671432, Saint Petersburg, Zhdanovskaya Str., 13; e-mail: lebedev.mIhall@yandex.ru

Evgeniy V. Makeykin – Cand. of Sci. (Military), Senior Researcher, 27 Scientific Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 111024, Moscow, passage of Enthusiasts, d. 19, p. 20; e-mail: E.Makeykin2305@gmail.com

Aleksandr F. Najdanov – Cand. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky; 671432, Saint Petersburg, Zhdanovskaya Str., 13; e-mail: naydanov@bk.ru

Igor' V. Svitnev – Cand. of Sci. (Military), Associate Professor, Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky; 671432, Saint Petersburg, Zhdanovskaya Str., 13; e-mail: isvitnev@mail.ru

Elena A. Haritonova – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Head of Department of Fundamentals of Medical and Special Knowledge, Saint Petersburg State University; 199034, Saint Petersburg, University embankment, 7–9; e-mail: xaritonova_ea@mail.ru

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределен следующим образом: математическая модель, формирование РЗМ – А. В. Вилков, Е. В. Макейкин, А. Ф. Найданов, анализ методов, список литературы, аннотация – Е. А. Харитонова, И. В. Свитнев, редакция по правилам журнала, англоязычная версия, сбор документов для разрешения на опубликование – М. Ю. Лебедев, рецензирование по вопросам нормативно-правовой базы – Кузьмин Ю. П.

Author contribution. All authors according to the ICMJE criteria participated in the development of the concept of the article, obtaining and analyzing factual data, writing and editing the text of the article, checking and approving the text of the article.

Special contribution: mathematical model, formation of REM – AVV, EVM, AFN, analysis of methods, list of references, abstract EAKh, IVS, editorial board according to the rules of the journal, English version, collection of documents for permission to publish MYL, review on issues of the regulatory framework YPK.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Disclosure. The authors declare that they have no competing interests.

Финансирование: исследование проведено без дополнительного финансирования.
Funding: the study was carried out without additional funding.

Поступила/Received: *21.03.2023*
Принята к печати/Accepted: *15.08.2024*
Опубликована/Published: 30.09.*2024*

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Кулганов В.А., Матюшенок К.В., Харитонова Е.А. Оценка поражающего действия ударной волны на человека и животных по показателям повреждаемости систем организма // *Экология и развитие общества*. 2022. № 1-2 (38), с. 74-83. [Kulganov V.A., Matyushenok K.V., Kharitonova E.A. Assessment of the damaging effect of a shock wave on humans and animals by indicators of damage to body systems. Ecology and social development, 2022, № 1-2 (38), pp. 74-83].
2. Калинкин Д.Е., Тахауов Р.М., Карпов А.Б., Самойлова Ю.А., Плаксин М.Б., Семенова Ю.В., Тахауов А.Р., Кириакиди Е.Н., Тахауова Л.Р. Факторы влияния на состояние здоровья взрослого населения, проживающего в зоне действия предприятия атомной индустрии. // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020. Т. 65 № 4. С. 5-11. [Kalinkin D.E., Takhauov R.M., Karpov A.V., Samoilova Yu.A., Plaksin M.B., Semenova Yu.V., Takhaouv A.R., Kiriakidi E.N., Takhauova L.R. Factors Infliencing the Health Condition of the Adult population Residing in the Activity Area of Atomic Industry Enterprise // *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020. Vol. 65. № 4. P. 5-11.] DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-5-11.
3. Петрова В.В., Шулепов П.А., Симагова Т.Д., Петров А.А. Разработка концепции цифрового двойника работника радиационно- и ядерно-опасного предприятия и производства // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2023. Т. 68. № 1. С. 19–24. [Petrova V.V., Shulepov P.A., Simagova T.D., Petrov A.A. The Concept if the digital Twin of the Radiation and Nuclear Facilities' Workers // Medical *Radiology and Radiation Safety*. 2023. Vol. 68. № 4. P. 19-24.] DOI: 10.33266/1024-6177-2023-68-1-19-24
4. Вооруженные Силы в Сирии. Научно-популярный труд. Специальная операция. Вооружение и военная техника. – М.: Красная Звезда, 2019. – С. 384. [The Armed Forces in Syria. Popular science work. A special operation. Armament and military equipment. – Moscow: Krasnaya Zvezda, 2019. – pp.384].
5. Соколов Д.А., Косырев С.В., Кислицына И.А. Методика расчета содержания загрязнителя на подстилающей поверхности с заданной вероятностью его достоверного определения // *Экология и развитие общества*. – СПб.: МАНЭБ, 2021. – № 1(35). – С. 31–38. [Sokolov D.A., Kosyrev S.V., Kislitsina I.A. Methodology for calculating the pollutant content on the underlying surface with a given probability of its reliable determination // *Ecology and social development*, 2022, № 1-2 (38), pp. 74-83].
6. Кашин А.С. Методы радиологического контроля объектов ветеринарного надзора, вычисления поглощенных доз облучения при поступлении радиоизотопов в организм продуктивных животных // *Вестник КрасГАУ*. 2019. № 7, с. 137-142.
7. Долгих А. П. Радиобиологическая модель расчёта вероятности гибели клеток млекопитающих при облучении их ионизирующим излучением с разной линейной потерей энергии / А. П. Долгих, Т. И. Павлик // *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2022. Т. 31, № 2. С. 97-110. [Dolgikh A. P. Radiobiological model for calculating the probability of mammalian cell death when irradiated with ionizing radiation with different linear energy loss / A. P. Dolgikh, T. I. Pavlik // *Radiation and risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Register)*. 2022. Vol. 31, No. 2. pp. 97-110]. DOI 10.21870/0131-3878-2022-31-2-97-110.
8. Петин В. Г. Комбинированное биологическое действие ионизирующих излучений и других вредных факторов окружающей среды (научный обзор) / В. Г. Петин, И. П. Дергачева, Г. П. Жураковская // *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2001. № 12. С. 117-134. [Petin V. G. Combined biological effect of ionizing radiation and other harmful environmental factors (scientific review) / V. G. Petin, I. P. Dergacheva, G. P. Zhurakovskaya // *Radiation and risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Register)*. 2001. No. 12. pp. 117-134.]

9. Кулганов, В. А. К вопросу оценки поражающего воздействия ионизирующего излучения на человека и защиты от него / В. А. Кулганов, С. В. Косырев, К. С. Васнецов // *Технологии гражданской безопасности*. 2023. Т. 20, № 1(75). С. 83-89. [Kulganov, V. A. On the issue of assessing the damaging effects of ionizing radiation on humans and protection from it / V. A. Kulganov, S. V. Kosyrev, K. S. Vasnetsov // Technologies of civil safety. - 2023. – Vol. 20, No. 1(75). – pp. 83-89.]
10. Галеева Г. З Воздействие ионизирующего излучения на человека и орган зрения / Г. З. Галеева, С. А. Рыжкин, С. Ю. Сергеева // *Практическая медицина*. 2016. № 7(99). С. 37-41. [Galeeva, G. Z. The effect of ionizing radiation on humans and the organ of vision / G. Z. Galieva, S. A. Ryzhkin, S. Yu. Sergeeva // Practical medicine. – 2016. – № 7(99). – Pp. 37-41]
11. Крышев, И. И. Радиационная безопасность окружающей среды. Обзор / И. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина // *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2018. Т. 27, № 3. С. 113-131. [Kryshev, I. I. Radiation safety of the environment. Review / I. I. Kryshev, T. G. Sazykina // *Radiation and risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Register)*. 2018. vol. 27, No. 3. pp. 113-131. DOI 10.21870/0131-3878-2018-27-3-113-131.