

УДК 621:664:658.562(075)

Анализ риска рака в течение жизни при внутреннем облучении природными радионуклидами в составе продуктов питания

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74

© Технологии гражданской безопасности, 2022

П.М. Юданов

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы мониторинга и контроля содержания радионуклидов, которые легко встраиваются в обмен веществ растений и животных и входят в продукты питания.

Автор считает определение естественного содержания радионуклидов в образцах продуктов питания и оценку риска заболевания раком вследствие внутреннего облучения содержащимися в них радионуклидами одним из путей предотвращения чрезвычайных ситуаций радиационного характера, который может служить защитой населения и территорий от поражающих факторов ионизирующего излучения.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация; радиация; внутреннее облучение; природные радионуклиды; продукты питания; риск рака; обмен веществ.

Analysis of Lifetime Cancer Risk From Internal Exposure to Natural Radionuclides in Food

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.4.74

© Civil Security Technology, 2022

P. Yudanov

Abstract

In the article, the author examines monitoring and control issues of the radionuclides content easily integrated into the metabolism of plants and animals being a part of food.

The author considers determination of radionuclides natural content of food samples and assessment of cancer risk due to internal exposure to radionuclides contained in them to be one of the ways to prevent radiation emergencies, which can serve as protection of the population and territories from the damaging factors of ionizing radiation.

Key words: emergency situation; radiation; internal exposure; natural radionuclides; food; cancer risk; metabolism.

29.04.2022

Введение

Природные радионуклиды многочисленны и распространены на нашей планете, они содержатся в воздухе, воде и почве. попадают в организм человека различными путями. При проглатывании радионуклидов они распадаются со спонтанным излучением, что вредит клеткам и тканям. Такие процессы вызывают мутацию в клетках ДНК, а также приводят к риску развития смертельных заболеваний. Все продукты так или иначе содержат некоторое количество искусственных и естественных радионуклидов, встречающихся в природе, таких как ^{226}Ra (радий), ^{232}Th (торий), ^{40}K (калий), ^{137}Cs (цезий) и др.

Радий — самый радиотоксичный природный радионуклид. Даже его небольшое количество, попавшее в организм, может накапливаться в костной ткани, что в дальнейшем приводит к внутренним изменениям костной ткани или костного мозга [1–4].

Около одной восьмой радиационного облучения населения во всем мире происходит за счет потребления продуктов питания [5].

Химические характеристики радионуклидов аналогичны питательным веществам, поэтому они попадают в почву с растениями вместе с питательными веществами, необходимыми для их роста. Исследование коэффициентов распределения радионуклидов при транспортировке из почвы в разные части растения зависит от окружающей среды [23–24].

Этот вопрос уже изучен многими учеными, и создана база данных, как ведут себя различные радионуклиды в растениях и продуктах питания. [6–9]. Ученые увеличили концентрацию калийных и фосфорных удобрений для растений, это привело к более высокой концентрации калия в организме. Однако такой радионуклид, как радон, находится в газообразном состоянии и в дальнейшем распадается, образуя твердое вещество. Эти продукты распада откладываются на поверхности листьев, а позже впитываются, насыщая их вредными веществами. Оценка дозы гамма-излучения от природных источников очень важна, поскольку естественная радиация способствует максимальной дозе внешнего облучения населения мира [20–22].

Расчетная годовая эффективная доза может помочь установить международный уровень радиоактивности, в частности — воздействие на общее население мира в результате употребления пищевых продуктов. Такие исследования могут помочь собрать статистику по людям, больным раком, а также служить сдерживающим фактором и гарантией, что фермеры и местные производители будут поддерживать уровень радионуклидов везде настолько низким, насколько возможно, что существенно снизит рост и развитие опасных заболеваний.

Методология

Отбор проб и предварительная обработка

В табл. 1 были отобраны продукты питания различного характера, такие как зерновые, бобовые, а также напитки. Торговые марки образцов скрыты для сохранения конфиденциальности. Обработка полученных

образцов перед анализом включала сушку на воздухе в течение 48 часов с последующим нагревом их в духовке в течение 3 часов для удаления влаги. Поскольку удельная концентрация активности зависит от веса образца, для этого необходимо было удалить лишнюю влагу из образцов [11].

Следующим шагом продукты проходили измельчение на мелкие частицы с помощью болгарки, ступки и пестика, после чего их просеивали, используя лабораторное (точное) сито 150 мкм. На последней стадии обработки их герметично закрывали на 4–6 недель для достижения радиоактивного равновесия между радоном и его дочерними ядрами до начала анализа с помощью NaI сцинтилляционного детектора. [12]

Таблица 1
Список пищевых продуктов, отобранных для настоящего исследования

Тип продуктов питания	Категория продуктов питания	Количество образцов каждой категории	Коды продуктов
Зерновые злаки	Пшеница	3	W1, W2, W3
	Просо	3	M1, M2, M3
	Ячмень	3	B1, B2, B3
	Овес	3	O1, O2, O3
	Кукуруза	3	C1, C2, C3
Бобовые	Рис	2	R1, R2
	Горох	3	P1.1, P1.2, P1.3
	Маш шлифованный	3	P2.1, P2.2, P2.3
	Маш черный	3	P3.1, P3.2, P3.3
	Чечевица	3	P4.1, P4.2, P4.3
	Чечевица красная	3	P5.1, P5.2, P5.3
Напитки	Фасоль	3	P6.1, P6.2, P6.3
	Кофе	2	V(C1), V(C2)
	Чай	2	V(T1), V(T2)
	Молоко	1	V(M)

Измерение концентрации активности

Каждый исследуемый образец анализировался в течение 3 часов для вычисления естественных радионуклидов, а именно: ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , с использованием кристаллического детектора NaI, размер $63 \times 63 \text{ мм}^2$. Спектрометр содержал 1024 канала, по которым регистрировались гамма-лучи, энергетический диапазон которых входил в пределы от 50 до 3000 кэВ, с энергетическим разрешением $<7,5\%$ и КПД $<20\%$. Он был стабилизирован с помощью эталонного источника ^{137}Cs на пике 661,6 кэВ. Рассматриваемые пики: 0,186, 2,615 и 1,46 МэВ для ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , соответственно. Цилиндрический корпус блока детектирования гамма-излучения состоит из детектора, аналогового фотоумножителя, подключенного к цифровому преобразователю и преобразователю напряжения, который далее подключен к внешней цепи.

Полная сборка была надежно защищена свинцом и медью для рентгенологического и фоновое контроля. Программное обеспечение для стабилизации спектрометра СПТР-МЕТ и программное обеспечение SPTR-АТС использовались для радиометрического анализа проб.

Концентрация активности рассчитывается по следующему выражению:

$$\text{Activity} = \frac{\text{CPS} \times 1000}{\epsilon_{\gamma} \times I_{\gamma} \times W(g)}, \quad (1)$$

где:

- CPS — количество раз в секунду;
- ϵ_{γ} — эффективность обнаружения гамма-излучения;
- I_{γ} — вероятность излучения соответствующей энергии гамма-излучения;
- W — вес в граммах.

Концентрация активности радионуклидов

Сорок образцов продуктов питания трех категорий, а именно: зерновые, бобовые и напитки, были исследованы на наличие ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Концентрация активности ^{226}Ra изменялась от 10 ± 1 Бк/кг (кофе С2)

до 20 ± 5 Бк / кг (пшеница W2), в среднем 16 Бк/кг, ^{232}Th ; от BDL до 10 ± 2 Бк / кг (чана), в среднем 6 Бк / кг и ^{40}K ; от 440 ± 56 (кукуруза) до 562 ± 70 Бк/кг (кофе), со средним значением 479 Бк / кг, как показано на рис. 1.

Значения всех радионуклидов, взятых во внимание, были сопоставлены с образцами из Саудовской Аравии, но концентрации ^{232}Th и ^{40}K оказались меньше, чем образцы из других регионов. Высокое значение ^{40}K вызывает наименьшее беспокойство, поскольку оно требуется организму для правильного функционирования, и его ценность гомеостатична, контролируется клетками тела, которые остаются почти неизменными. [13–15]

Результаты и обсуждение

В каждой из отдельной категории зерновых культур, в бобовых и в напитках, кукурузе (12 ± 3 Бк / кг), чечевице (13 ± 2 Бк/кг) и кофе (10 ± 1 Бк/кг), соответственно, было обнаружено наименьшее количество ^{226}Ra . При этом в кукурузе (440 ± 56 Бк/кг), фасоли (447 ± 57 Бк/кг) и молоке (491 ± 62 Бк/кг) было измерено минимальное значение ^{40}K , как видно на рис. 2.

В некоторых образцах зерновых культур, таких как: пшеница, кукуруза, ячмень и просо, активность ^{232}Th

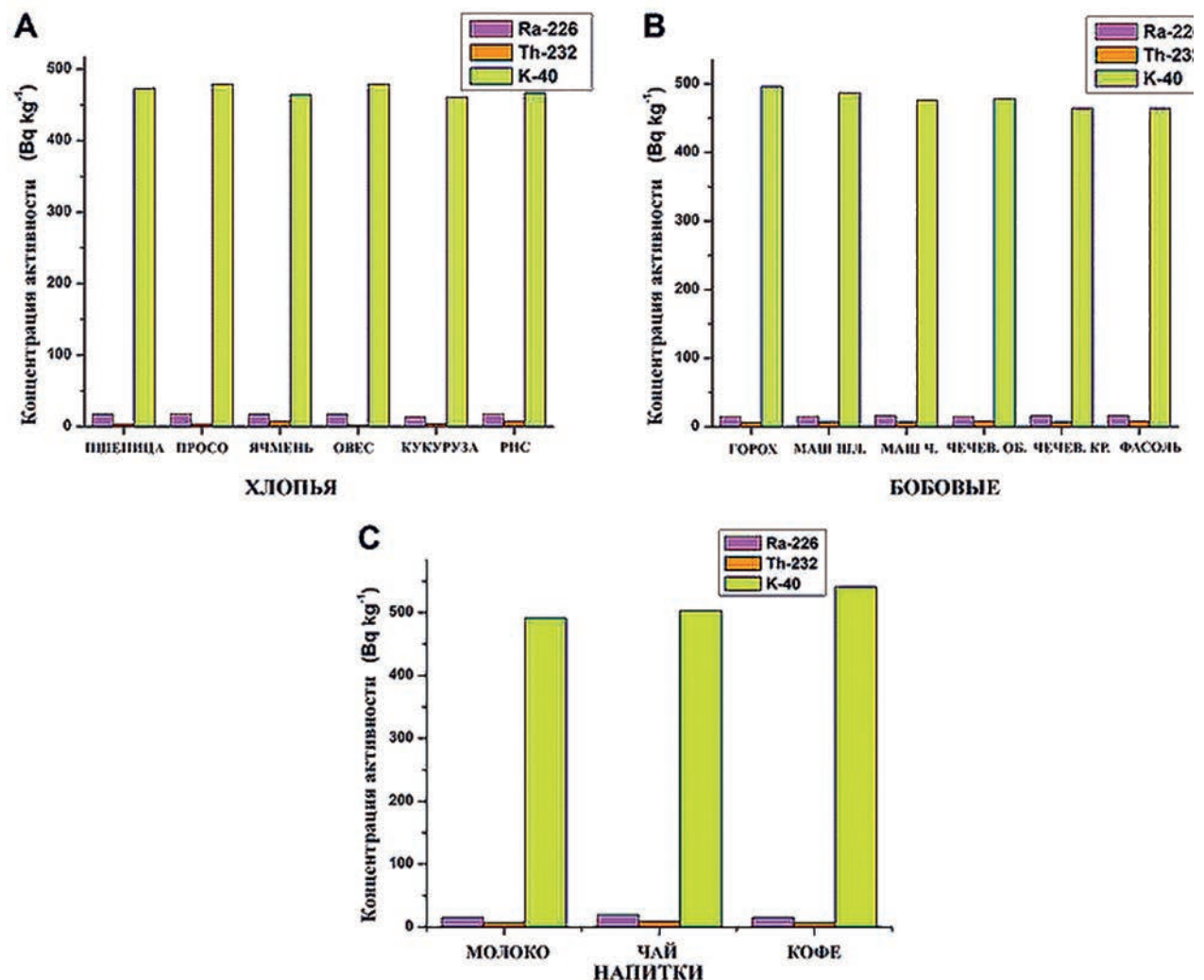


Рис. 1. Гистограмма, показывающая концентрацию активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в (А) зернах злаков, (В) бобах, (С) напитках

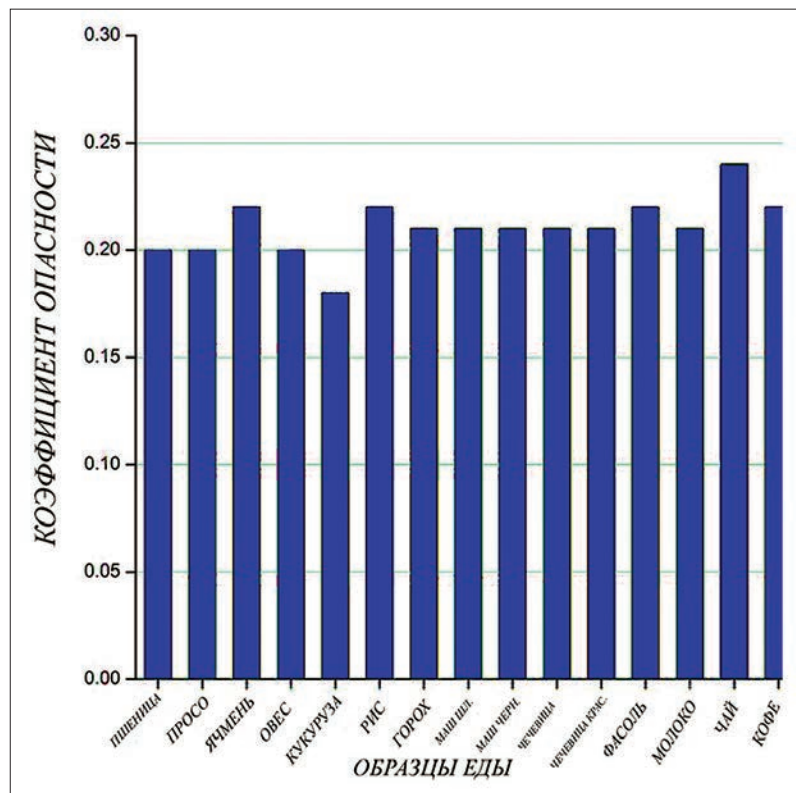


Рис. 2. Гистограмма, отображающая коэффициент опасности для различных образцов круп, бобовых и напитков

оказалась ниже обнаруживаемого предела, тогда как во всех остальных уровень радионуклидов был значительно выше обнаруживаемого предела: 3 Бк/кг, 3 Бк/кг и 30 Бк/кг для ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , соответственно, как показано в табл. 2.

Радиевый эквивалент

Радиевый эквивалент — это очень важная мера однородной активности разных радионуклидов с точки зрения активности радия; она и вызывает опасность, связанную с продуктами питания, содержащими ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K .

Он измеряется в Бк/кг и определяется по формуле:

$$Ra_{\text{eq}} = A_{\text{Ra}} + (1,43 \times A_{\text{Th}}) + (0,077 \times A_{\text{K}}), \quad (2)$$

где A_{Ra} , A_{Th} и A_{K} — концентрация активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , соответственно.

Исследования показали, что наименьшее значение радиевого эквивалента было у кукурузы (55 Бк / кг), а наибольшее у чая (70 Бк/кг), со средним значением 62 Бк / кг, медианой 63 Бк / кг и стандартным отклонением 4 Бк / кг. Его значение для всех образцов не сильно различалось и находилось в пределах допустимых значений 370 Бк / кг в соответствии с общими рекомендациями. [16–18]

Коэффициент опасности

Коэффициент внутренней опасности (HI) количественно оценивает возникновение респираторных заболеваний из-за радона и его короткоживущих дочерних

элементов через потребление пищевых продуктов. Этот безразмерный показатель рассчитывается по формуле (3), как показано в табл. 2:

$$HI = \frac{A_{\text{Ra}}}{185} + \frac{A_{\text{Th}}}{259} + \frac{A_{\text{K}}}{4810} \leq 1. \quad (3)$$

Таблица 2
Значения утвержденные в 2000 году

	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Взрослые	280	230	6.2
Дети	800	290	13
Младенцы	960	450	42

Индекс опасности был практически постоянным для всех образцов, наблюдаемое значение составляет 0,18–0,24 (рис. 2).

Было обнаружено значение «ВЫСОКОЕ» в некоторых исследуемых напитках, оно почти в 10 раз больше, чем должно быть. Тем не менее, эти «ВЫСОКИЕ» показатели были ниже порогового уровня 1.

Отсюда можно сделать вывод, что образцы, которые использовались для анализа, пригодны для безопасного употребления.

Годовая эффективная доза (D)

Эффективная доза учитывает чувствительность различных органов и ущерб, причиненный им посредством радиационного воздействия. Годовая эффективная доза необходима для оценки опасности радиологического воздействия на организм человека, поэтому крайне

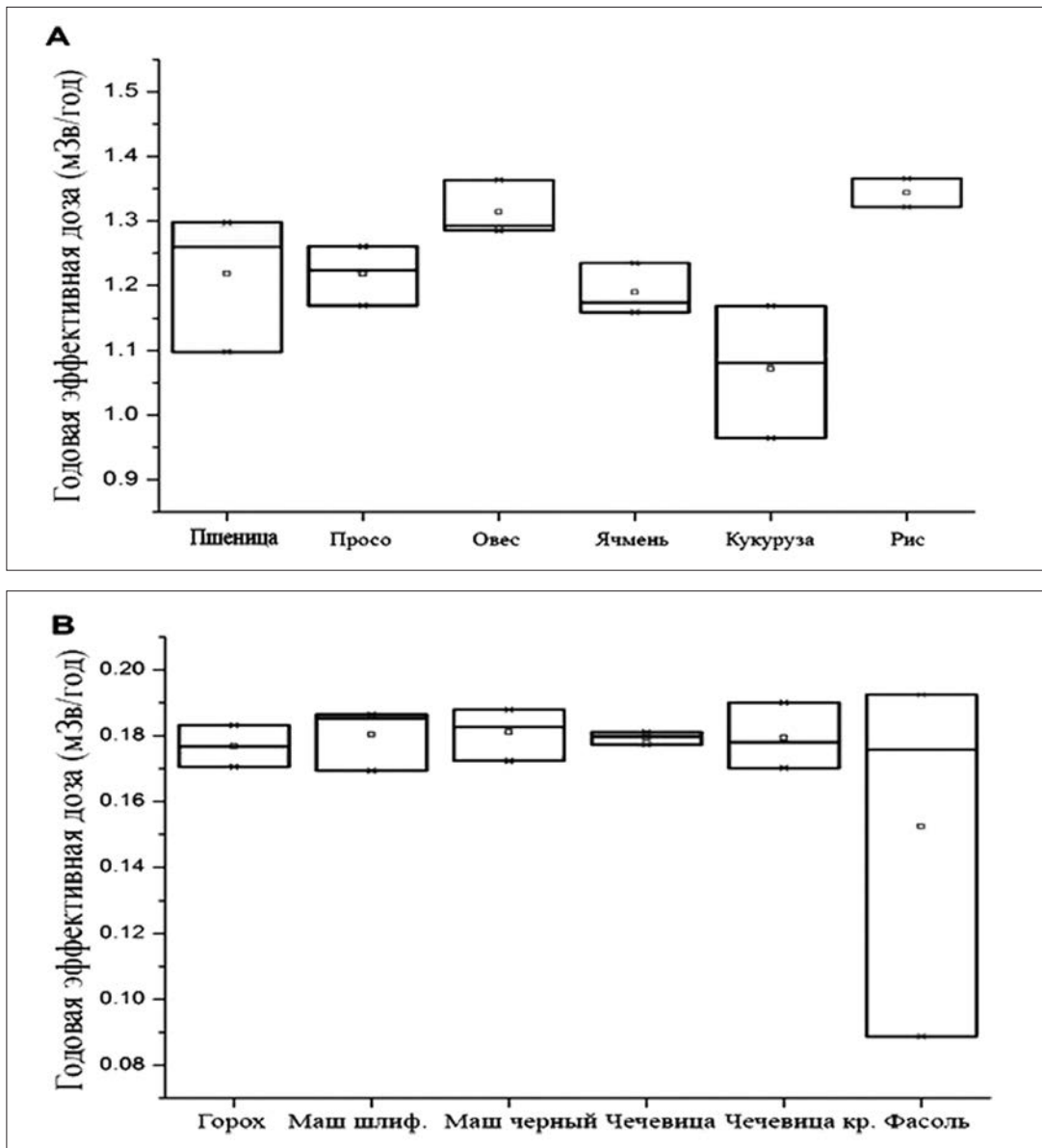


Рис. 3. Годовая эффективная доза от радионуклидов в продуктах питания

важно учитывать именно этот диапазон при исследовании основных образцов.

Для зерновых злаков было взято: 140 кг / год для взрослых; 90 кг / год для детей (10 лет) и 45 кг/год для младенцев (1 год) [24]. При расчете годовой эффективной дозы зернобобовых и напитков учитывалась только возрастная группа взрослых: ИН для зернобобовых, чая, кофе и молока составила 20 кг / год.

Принимая во внимание только злаки, годовая эффективная доза (D) рассчитана для трех возрастных групп, а именно: взрослые, дети и младенцы, как показано в табл. 2. Очевидно, что дети являются наиболее чувствительной группой населения в связи с тем, что концентрация калия по отношению к их массе тела выше. Поскольку младенцы потребляют только молоко в течение первых 6 месяцев, вклад в дозу не вносят зерна злаков и бобовых в течение этого периода.

Этим периодом можно пренебречь, однако, среднегодовая эффективная доза для взрослых за счет потребления различных злаков — 1,21 мЗв/год. Медицинские

исследования рекомендуют ежедневную дозу 40 граммов зернобобовых в сбалансированном рационе для взрослых, страдающих различными заболеваниями и вынужденных сидеть на диете. А также рекомендуемая суточная доза зерна злаков для здорового человека — 396 граммов для взрослого человека.

Самый высокий показатель годовой эффективной дозы достигается за счет потребления риса для всех возрастов. Рис — это растение, которое требует большого количества воды; высокая доза достигается за счет вымывания из стоячей воды на полях и быстрого коэффициента передачи от почвы к растению. Из таблиц 2 и 3 видно, что годовая эффективная доза для взрослых: максимум — за счет злаков (1,21 мЗв год) и минимум — за счет напитков (0,36 мЗв / год). Среднегодовая эффективная доза в мире составляет 2,4 мЗв / год. Доза, поступающая от зерновых, существенно увеличивается по сравнению с бобовыми и напитками из-за количества и регулярности потребления.

Заключение

Такое исследование помогло нам установить активные диапазоны земных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K), присутствующих в некоторых пищевых продуктах, доступных на местных рынках и в магазинах для потребления людьми. Концентрация активности для всех образцов пищевых продуктов находилась в установленных пределах: 1000, 1000 и 4000 Бк/кг для ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Для всех

образцов пищевых продуктов радиевый эквивалент колебался от 55 Бк/кг до 70 Бк/кг, но был в пределах безопасных значений. Хотя коэффициент опасности оказался в сто раз выше, чем допустимое значение для других стран, его значение все же входило в безопасный предел, что в среднем составляет 0,21 Бк/кг. Высокая концентрация некоторых радионуклидов в почве и пище подразумевает дальнейшее изучение его активности, фитодоступности и распространения [19–20].

Литература

1. *Валуев Н. П., Пушкин И. А., Лысова О. В.* Аппаратура для высокопроизводительного контроля радиационной обстановки // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2010. № 2. С. 21–24.
2. *Валуев Н. П., Сергеев И. Ю., Николаев Г. А.* Обоснование рациональных параметров системы мониторинга радиационной обстановки // В сб. «Химические и материаловедческие аспекты техносферной безопасности». Химки: АГЗ МЧС России, 2021. С. 75–85.
3. *Сергеев И. С., Юркин Г. Ю., Шубкин Р. Г.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Онлайн-калькулятор отнесения объектов защиты к определенной категории риска». № 2021669152. 2021.
4. *Валуев Н. П., Сергеев И. Ю.* Динамический контроль радиационной обстановки на территориях // В сборнике: Проблемы обеспечения химической безопасности. Академия гражданской защиты МЧС России. Химки: АГЗ МЧС России, 2021. С. 28–32.
5. *Сергеев И. Ю., Косырев П. Н.* Методика определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки // Технологии гражданской безопасности. 2021. Т. 18. № 2(68). С. 67–70.
6. *Сергеев И. Ю., Валуев Н. П.* Определение параметров динамического радиационного контроля в акваториях // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 1(20). С. 63–67.
7. *Мазаник А. И., Валуев Н. П., Сергеев И. Ю., Николаев Г. А.* Методический подход к решению задачи обоснования рациональных параметров системы мониторинга радиационной обстановки для обнаружения локальных источников ионизирующего излучения террористического происхождения // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 2 (21). С. 78–84.
8. *Сергеев И. Ю., Валуев Н. П.* Обнаружение и определение местоположения и радиационной опасности источников при динамическом мониторинге территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 3(22). С. 116–120.
9. *Валуев Н. П., Лысова О. В., Никоненков Н. В., Пушкин И. А.* Радиационный контроль движущихся транспортных средств с помощью высокочувствительных дозиметрических систем // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2011. № 4. С. 36–40.
10. *Валуев Н. П., Никоненков Н. В., Сергеев И. Ю., Стасишин Л. А.* Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2015. № 9. С. 35–39.
11. *Валуев Н. П., Лысова О. В., Сергеев И. Ю.* Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 3. С. 47–50.
12. *Валуев Н. П., Пушкин И. А., Стасишин Л. А.* Повышение эффективности контроля наземных транспортных средств высокочувствительных дозиметрических систем // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2013. № 8. С. 44–48.
13. *Валуев Н. П., Никоненков Н. В., Сергеев И. Ю., Стасишин Л. А.* Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2015. № 9. С. 35–39.
14. *Сергеев И. Ю., Гарелина С. А., Латышенко К. П., Валуев Н. П.* Математическое моделирование дозиметрических систем контроля // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 1 (16). С. 64–68.
15. *Валуев Н. П., Сергеев И. Ю.* Способ определения местоположения источника радиации в транспортном средстве при динамическом контроле // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. № 2. С. 70–75.
16. *Сергеев И. Ю., Валуев Н. П.* Способ определения местоположения источника радиации в транспортном средстве при динамическом контроле // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. № 2. С. 70–75.
17. *Сергеев И. Ю.* Предложения по способам контроля радиационной обстановки для системы комплексной безопасности закрытого административного территориального образования с объектами атомной промышленности // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. № 1. С. 63–71.
18. *Валуев Н. П., Лысова О. В., Сергеев И. Ю.* Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // Сб. докладов XX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций «Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий». Москва, 2015 года. С. 169–171.
19. *Сергеев И. Ю., Пашинин В. А., Валуев Н. П., Косырев П. Н.* Способ аэродинамического контроля радиационной обстановки // Технологии гражданской безопасности. 2018. Т. 15. № 4 (58). С. 84–87.
20. *Сергеев И. Ю.* Выбор методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 1 (12). С. 8–11.
21. *Валуев Н. П., Никоненков Н. В., Стасишин Л. А.* Автомобильная система динамического радиационного мониторинга территорий // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2017. № 2. С. 37–41.
22. *Марков Г. С., Онищенко Ю. А., Щеголькова В. В., Макарова М. Ю.* Особенности жизненного цикла аварийно-спасательной техники // Технологии гражданской безопасности. 2014. Т. 11. № 2. С. 76–80.
23. *Виноградов А. Ю., Баканов С. В., Потепенко Ю. П.* Анализ современных и перспективных аварийно-спасательных машин, инструментов и приборов для оснащения формирований РСЧС и подготовки спасателей // Технологии гражданской безопасности. 2007. Т. 4. № 2. С. 103–107.
24. *Марков Г. С.* Актуальные направления в развитии аварийно-спасательной техники и технологий // Технологии гражданской безопасности. 2009. Т. 6. № 3–4. С. 187–190.

Сведения об авторах

Юданов Петр Максимович: к. т. н., АГЗ МЧС России, ст. препод. каф. механики и инженерной графики. Химки, Россия.
SPIN-код: 3497-3807.

Information about authors

Yudanov Petr M.: PhD (Technical Sc.), Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia, Senior Lecturer, Department of Mechanics and Engineering Graphics. Khimki, Russia.
SPIN-scientific: 3497-3807.