

УДК 621

DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0030

ПРИРОДНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ: ФАКТОРЫ ПЕРЕНОСА И ОЦЕНКИ ДОЗЫ

©2022

Юданов Петр Максимович, кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики
Академия гражданской защиты МЧС России
(141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск)

Аннотация. Данная работа относится к области контроля и мониторинга коэффициентов переноса радионуклидов в корнеплоды и их концентрации в пищевых продуктах для предотвращения ЧС радиационного характера в целях защиты населения и территорий от поражающих факторов ионизирующего излучения. Результаты данной статьи можно считать усовершенствованную методику гамма-спектроскопического анализа почвенных радионуклидов, а также рассчитанные средние значения концентрации активности для ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в 80 ± 41 , 56 ± 12 , 516 ± 119 Бк/кг, рассчитанные значения коэффициентов переноса в 0,03, 0,11 и 0,31 соответственно. Результаты данной работы будут полезны контролирующим органам подразделений МЧС России и предприятий сельского хозяйства определения средних уровней активности радионуклидов в культивируемых корнеплодах, а также для сравнения и статистики методов культивации. Важнейшими методами, использовавшимися в данной работе, являлись методы математической статистики и векторной визуализации гистограмм. Для визуализации было использовано программное обеспечение и пакет программ *Excel* и *SciLab*. Концентрации активности естественных радионуклидов в свёкле и картофеле были оценены в двух важнейших сельскохозяйственных регионах Российской Федерации (Смоленская область и республика Мордовия) вместе с образцами почвы, забираемых из почвы с различной глубины в соответствии с залеганием корневой системы исследуемых корнеплодов.

Ключевые слова: системы дозиметрического контроля, коэффициенты переноса, источник излучения, дозиметрический контроль корнеплодов, радиационные чрезвычайные ситуации.

NATURAL RADIONUCLIDES IN ROOT AND SOIL OF THE RUSSIAN FEDERATION: FACTORS OF TRANSFER AND ASSESSMENT OF DOSE

©2022

Yudanov Petr Maksimovich, candidate of technical sciences,
senior lecturer of the department of Mechanics and Engineering drawing
Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia
(141435, Moscow region, city of Khimki, Novogorsk location)

Abstract. This work relates to the field of control and monitoring of the transfer coefficients of radionuclides into root crops and their concentration in food products to prevent radiation emergencies in order to protect the population and territories from the damaging factors of ionizing radiation. The results of this article can be considered the improved method of gamma-spectroscopic analysis of soil radionuclides, as well as the calculated average values of the activity concentration for ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in 80 ± 41 , 56 ± 12 , 516 ± 119 Bq / kg, the calculated values of the transfer coefficients in 0, 03, 0.11 and 0.31, respectively. The results of this work will be useful to the regulatory bodies of the EMERCOM of Russia and agricultural enterprises in determining the average levels of radionuclide activity in cultivated root crops, as well as for comparing and statistics of cultivation methods. The most important methods used in this work were the methods of mathematical statistics and vector visualization of histograms. *Excel* and *SciLab* software and software packages were used for visualization. The concentration of the activity of natural radionuclides in beets and potatoes was estimated in two most important agricultural regions of the Russian Federation (Smolensk region and the Republic of Mordovia) together with soil samples taken from the soil at different depths in accordance with the occurrence of the root system of the studied root crops.

Keywords: dosimetric control systems, transfer coefficients, radiation source, dosimetric control of root crops, radiation emergencies.

Введение. Встречающиеся в природе радиоактивные материалы содержат природные радионуклиды, такие как ^{238}U , ^{232}Th и их продукты-потомки, и ^{40}K всегда находятся в окружающей среде. Эти природные источники радиации являются одними из самых высоких факторов воздействия радиации на население [1]. Однако искусственные радионуклиды также присутствуют в окружающей среде. Это результат

испытаний ядерного оружия и ядерных аварий. Перенос радионуклидов через окружающую среду различными путями, такими как атмосфера, водные системы и подземные слои почвы, также способствует воздействию радиации на человека. Однако высокий процент воздействия радиации на человека происходит из-за поглощения растительности, посаженной в естественной среде [1-7].

Исследование поглощения радионуклидов из почвы растениями становится необходимым в связи с их большим вкладом в дозу внутреннего облучения человека и в понимании факторов, влияющих на процесс поглощения. Таким образом, в последние годы во всем мире возрос интерес к определению факторов переноса радионуклидов (*TFS*) из почвы в растения [3-10]. Следовательно, необходимо определить и оценить активность различных радионуклидов, присутствующих в почве, и их содержание в различных образцах пищевых продуктов.

В РФ картофель и свёкла являются одними из наиболее потребляемых культур после овса, пшеницы и кукурузы. Свёкла широко используется в пищевой продукции: листья – для приготовления салатов, корневища – для салатов, супов, закусок, напитков (в том числе кваса) и даже десертов. В 2016 году по оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН РФ произведена 31,1 миллион тонн картофеля, что не может не говорить о важности данной культуры для нашего государства. В том же году общая площадь 1 млн. га была отведена под производство свёклы с потенциальным урожаем 44,1 миллиона тонн [11]. В последние несколько лет несколько исследователей изучали различные аспекты радиоактивности почвы и растений в РФ [6-7, 12-14]. В этом исследовании была рассмотрена концентрация активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в почве, корнеплодах свёклы и картофеля в Смоленской области и республике Мордовия. Кроме того, были рассчитаны факторы переноса от почвы до этих растений. Результат должен предоставить важную информацию о содержании радиоактивности в картофеле и свёкле, широко потребляемых в РФ, а также поглощении ими радионуклидов.

Целью данного исследования являлось установление соответствия концентраций радиоактивных изотопов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в почве и среднегодовых эффективных доз облучения пределам общемировых диапазонов, а также совершенствование методики гамма-спектроскопического анализа почвенных радионуклидов.

Материалы и результаты исследования. Образцы почвы и корнеплодов были взяты с плантации в двух разных областях: в Смоленской области и республике Мордовия. На рисунке 1 показана карта с расположением мест отбора проб. В этих областях картофель и свёкла производятся с использованием развивающихся методов, которые в значительной степени являются сравнительными. Большая часть сортов развивается в сухих условиях, поле остается сухим во время посадки [8-10]. Фермеры не практикуют севооборот, и одни и те же культуры выращиваются на одних и тех же полях из года в год. Местные агрономы выращивают эти корнеплоды, используя близлежащие водные ресурсы, а также следуя традиционным методам вспашки, кондиционирования и посадки. Большинство фермеров используют комплексные удобрения, азотные, фосфорные и калийные удобрения (*NPK*) 15-15-15 и *NPK* 13-13-21, наиболее доступные

типы на рынке. Максимальная норма внесения удобрений составляет 50-80 г на 1 кв. м. [10, 12]



Рисунок 1 – Местонахождение сбора образцов проб

Сбор и подготовка проб. Образцы почвы были собраны в местах, указанных на рисунке 1. Все образцы почвы были собраны на глубине 10-20 см от поверхности [2]. В каждой области было определено шесть точек отбора проб, в общей сложности ~12 точек. В каждом месте образцы почвы (а также образцы растений) были собраны в трех экземплярах (три образца ~5 кг каждый) и были обработаны и проанализированы отдельно. Затем средние значения, полученные из этих трех выборок, были взяты для представления данных для соответствующего местоположения. Точки отбора проб были пронумерованы от 1 до 12 (*P1-P12*), соответствующие 12 исследованным местоположениям. Образцы почвы были помечены последовательно: от *P1* до *P6* в Республике Мордовия и от *P7* до *P12* в Смоленской области. Образцы почвы были высушены при 110°C в течение 24 часов в духовке для удаления влаги и сырости. После этого высушенные образцы почвы измельчали и просеивали в сито диаметром 1 мм. Затем образец массой 1000 г поместили в стандартный 1-литровый сосуд Мариелли. Образцы были плотно запечатаны и хранились в течение ~30 дней до измерения, чтобы обеспечить достижение весового равновесия для ^{238}U , ^{232}Th их соответствующими продуктами [11].

Образцы растений были собраны во время сезона урожая, когда в каждом месте было собрано большое количество образцов. Как и в случае с образцами почвы, образцы растений были собраны в трех экземплярах, при этом начальный размер образца варьировался от 3 до 5 кг. Образцы были промыты дистиллированной водой для удаления любых загрязнений, а несъедобные части были удалены. Затем клубни были использованы для дальнейшего анализа.

После клубни измельчали, сушили в духовке в течение ~ 48 часов при постоянной температуре около 90°C до достижения постоянного веса. Высушенные образцы затем измельчали в блендере и просеивали с помощью сита диаметром 1 мм и хранили в плотно закрытом 1-литровом сосуде Маринелли не менее 30 дней до измерений.

Измерения активности образцов почвы и растений. Для измерения концентраций активности в этом исследовании использовался детектор высокой чистоты *p*-типа германия ОЧГ (HPG) (Канберра, Инс.) [4]. Детектор имеет разрешение 1,9 кэВ при 1333 кэВ линии гамма-излучения ^{60}Co и относительную эффективность 40% по сравнению с $3 \times 3 \text{ NaI}$ на линии 133 кэВ. Для измерения и анализа использовалось программное обеспечение MAESTRO. ОЧГ экранирован 3,5 см свинца, чтобы уменьшить фон гамма-излучения. [12]. Детектор был откалиброван как по энергопотреблению, так и по эффективности с использованием стандартных протоколов и сертифицированного мульти-гамма-источника, имеющего матрицу, аналогичную матрице образцов. Мульти-гамма-источник содержит радионуклиды ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{22}Na и ^{133}Ba , которые охватывают диапазон энергий от 59,54 до 1408,30 кэВ [19-20].

Все образцы были измерены в течение 24 часов.

Таблица 1 – Концентрации активности (бк/кг сухого веса) для ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K в образцах овощей и почвы. Также перечислены TFS радионуклидов из почвы в овощи

Растение	Область	Точка Сбора	Концентрация активности (бк/кг) в сухой почве			Концентрация активности (бк/кг) в сухих овощах			Рассчитанный TF Бк.кг ⁻¹ сухие овощи/бк.кг ⁻¹ сухая почва		
			²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Картофель	Республика Мордовия	P1	72 ± 3	67 ± 4	648 ± 94	2.8 ± 0.9	10 ± 2	211 ± 36	0.039	0.15	0.33
		P2	59 ± 2	44 ± 6	437 ± 66	2.9 ± 0.8	8 ± 2	141 ± 56	0.049	0.18	0.32
		P3	79 ± 8	54 ± 7	543 ± 45	2.4 ± 0.9	4 ± 1	208 ± 43	0.030	0.07	0.38
		P4	75 ± 8	54 ± 9	453 ± 96	1.8 ± 0.5	5 ± 1	150 ± 34	0.024	0.09	0.33
	Смоленская область	P7	72 ± 12	54 ± 16	457 ± 111	1.5 ± 0.5	7 ± 1	170 ± 41	0.021	0.13	0.37
		P8	77 ± 10	63 ± 7	747 ± 148	1.5 ± 0.2	6 ± 1	160 ± 36	0.019	0.10	0.21
		P9	49 ± 3	49 ± 4	540 ± 87	1.7 ± 0.4	5 ± 2	108 ± 30	0.035	0.10	0.20
		P10	74 ± 3	63 ± 8	481 ± 79	1.5 ± 0.5	4 ± 1	149 ± 44	0.020	0.06	0.31
	Среднее значение:								0.030	0.11	0.31
	Свёкла	Республика Мордовия	P5	63 ± 9	38 ± 4	371 ± 56	2.3 ± 0.6	6 ± 2	121 ± 41	0.037	0.16
P6			54 ± 10	37 ± 5	468 ± 54	2.0 ± 0.2	6 ± 1	92 ± 31	0.037	0.16	0.20
Смоленская область		P11	88 ± 15	75 ± 3	373 ± 79	1.8 ± 0.2	6 ± 1	159 ± 52	0.020	0.08	0.43
		P12	207 ± 31	69 ± 10	676 ± 31	1.6 ± 0.2	5 ± 1	240 ± 114	0.008	0.07	0.36
Среднее значение								0.025	0.12	0.33	
Среднее значение всех показателей			80 ± 41	56 ± 12	516 ± 119	2.0 ± 0.5	6 ± 2	153 ± 49	0.028 ± 0.011	0.11 ± 0.04	0.31 ± 0.09

Результаты концентраций радиоактивности природных радионуклидов: ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K образцах почвы, свёклы и картофеля представлены в таблице 1.

Все концентрации активности указаны в Бк/кг в пересчете на сухой вес. Как видно из таблицы 1, концентрации активности ^{226}Ra для всех образцов почвы были сопоставимы, за исключением образца из местоположения P12 в Смоленской области (с концентрацией активности 207 Бк/кг).

Диапазон концентрации активности ^{226}Ra для всех образцов почвы составлял 54-207 Бк/кг при среднем значении ($\pm SD$) 80 ± 41 Бк/кг. Аналогичным образом, концентрации активности ^{232}Th и ^{40}K не показали существенных различий в зависимости от местоположения.

Диапазон концентраций активности ^{232}Th и ^{40}K составлял (в Бк/кг): 37-75 и 371-747 соответственно.

Концентрация радиоактивности ^{226}Ra была рассчитана по средневзвешенному значению концентраций активности продуктов ее распада: ^{214}Pb (линии 295,22 и 351,93 кэВ) и ^{214}Bi (линии 609,31 и 1120,28 кэВ). Аналогично, концентрация активности ^{232}Th была принята за средневзвешенное значение продуктов ее распада ^{212}Pb (линия 238,63 кэВ), ^{228}Ac (линии 911,20 и 968,97 кэВ) и ^{208}Tl (линия 583,19 кэВ). Концентрация активности ^{40}K была рассчитана непосредственно с использованием ее гамма-излучения 1460,83 кэВ.

Расчеты факторов переноса радионуклидов (TF). Факторы переноса данного радионуклида используется для описания поглощения этого радионуклида из почвы в конкретное растение. В этом исследовании интерес представляют радионуклиды ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K в свёкле и картофеле (в данном случае клубней). Как правило, концентрация активности радионуклида в растении считается линейно зависимой от концентрации в почве, и следовательно, фактор переноса определяется как соотношение двух концентраций активности: TF [15-18]:

$$TF = C_p / C_s \quad (1)$$

Где C_p и C_s – концентрации радиоактивности растения и почвы соответственно. Все концентрации радиоактивности, указанные здесь, указаны в Бк/кг сухого веса как почвы, так и овощей [18].

Соответствующие средние значения концентраций активности (в Бк/кг) ($\pm SD$) были следующими: 56 ± 12 и 516 ± 119. Здесь следует отметить, что результаты не показали существенной зависимости от региона выборки.

Вывод. Нужно подчеркнуть, что средние концентрации активности естественной радиоактивности в почве, указанные здесь, несколько выше, чем средневзвешенное значение для населения мира, сообщенное Научным комитетом Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (НКДАР ООН) 2000 (1), для ^{232}Th (56 / 45 Бк/кг) и ^{40}K (516 / 420 Бк/кг) и значительно выше, чем сообщенное значение ^{226}Ra (80 / 32 Бк/кг). Однако по сравнению с сообщенными значениями в РФ, приведенными в том же отчете, концентрации активности ^{226}Ra и ^{232}Th находятся в пределах заявленных диапазонов 38-94 Бк/кг и

63-110 Бк/кг соответственно.

Концентрация активности ^{40}K , однако, выше, чем средняя концентрация активности в почве РФ в 310 Бк/кг, о которой сообщает UNSCEAR 2000 [1]. Это ожидаемо, поскольку исследуемая здесь почва является сельскохозяйственной, она обрабатывается удобрениями, и это, как известно, приводит к увеличению концентрации калия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

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., 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
3. David Michael Pfund, Robert C. Runkle, Kevin K. Anderson, and Kenneth D. Jarman, Examination of Count-Starved Gamma Spectra Using the Method of Spectral Comparison Ratios, IEEE Transact. Nucl. Sci., Vol. 54/4/2007
4. W. R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", New York: Springer-Verlag, 1987, pp. 157–163.
5. MCNP X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA UR 03 1987, Los Alamos National Laboratory, April 2003. The MCNP5 code can be obtained from the Radiation Safety Information Computational Center (RSICC), P. O. Box 2008, Oak Ridge, TN, 37831-6362.
6. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Сергеев И.Ю., Сташин Л.А. Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем. Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2015. С.35-39.
7. 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.
8. Валуев Н.П., Пушкин И.А., Сташин Л.А. Повышение эффективности контроля наземных транспортных средств высокочувствительных дозиметрических систем // ГРУЗО-ВИК. – 2013. – №8. – С. 44-48.
9. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Сергеев И.Ю., Сташин Л.А. Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем // Ежемесячный научно-технический и производственный журнал «Грузовик». – 2015. – №9. – Москва: ООО «Издательство Машиностроение». – С. 35-39
10. Сергеев И.Ю., Гарелина С.А., Латышенко К.П., Валуев Н.П. Математическое моделирование дозиметрических систем контроля // Научно-аналитический журнал: «Сибирский пожарно-спасательный вестник». – 2020. – № 1 (16). – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – С. 64-68.
11. 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. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России. – С. 70-75.
12. Сергеев И.Ю., Валуев Н.П. Способ определения местоположения источника радиации в транспортном средстве при динамическом контроле. Научный журнал «Научные и образовательные проблемы гражданской защиты». – 2016, № 2, с.70-75.
13. 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. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России. – С.63–71.
14. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов. // Сборник 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.
15. Сергеев И.Ю., Пашинин В.А., Валуев Н.П., Косырев П.Н. Способ аэродинамического контроля радиационной обстановки. Технологии гражданской безопасности. ВНИИ-ГОЧС МЧС России (ФИЦ) Том 15, 2018, № 4 (58). С. 84-87.
16. 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.
17. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Сташин Л.А. Автомобильная система динамического радиационного мониторинга территорий. «Грузовик» – 2017, №2, С. 37-41.
18. Марков Г.С., Онищенко Ю.А., Щеголькова В.В., Макарова М.Ю. Особенности жизненного цикла аварийно-спасательной техники // Технологии гражданской безопасности - 2014. - №2. -Том: 11 - С.76-80
19. Виноградов А.Ю., Баканов С.В., Потапенко Ю.П. Анализ современных и перспективных аварийно-спасательных машин, инструментов и приборов для оснащения формирований РСЧС и подготовки спасателей // Технологии гражданской безопасности -2007. - №2. -Т. 4 - С.103-107
20. Марков Г.С. Актуальные направления в развитии аварийно-спасательной техники и технологий. // Технологии гражданской безопасности - 2009. - №3-4. - Т. 6 - С.187-190

Статья поступила в редакцию 08.02.2022

Статья принята к публикации 10.03.2022