

Радиационное воздействие на территориях с повышенным содержанием цезия-137 в почве

В статье представлена консервативная оценка значений ожидаемой эффективной дозы для жителей населенных пунктов, расположенных в зоне наблюдения ФГУП «ПО «Маяк». Данные о содержании ^{137}Cs были получены в ходе полевых инструментальных исследований. Среднее значение удельной активности ^{137}Cs составило 62,5 Бк/кг, что соответствует в среднем поверхностной активности 15,0 кБк/м² для слоя почвы 10 см. Результаты показали, что годовой предел дозы для населения от установленного уровня загрязнения почвы ^{137}Cs не превышает ни при отдельной, ни при совместной реализации рассмотренных сценариев облучения.

Ключевые слова:

радионуклиды, почва, удельная активность, ветровой подъем, эффективная доза, окружающая среда, зона наблюдения.

А.Р.Зигангиров¹, Е.С.Макеева¹,
А.А.Екидин²

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

² Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В результате ряда радиационных инцидентов, произошедших на начальных этапах развития советской атомной промышленности, обширная территория на севере Челябинской области подверглась радиационному загрязнению. Кыштымская авария 1957 г. привела к выбросу в окружающую среду 20 МКи радиоактивных веществ, при этом около 2 МКи было поднято в воздух и в дальнейшем осело на прилегающей территории, образовав Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) [1]. Карачевский инцидент 1967 г., в результате которого в окружающую среду попало 600 Ки радиоактивных веществ [2], также оказал влияние на радиационную обстановку региона. В обоих случаях радиоактивные вещества содержали радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs . Общая площадь территорий, подвергшихся загрязнению более чем 0,1 Ки/км², составила

23000 км². На наиболее загрязненной территории в 1966 г. был учрежден Восточно-Уральский государственный заповедник (ВУГЗ) площадью в 166 км².

ВУГЗ и прилегающие к нему территории являются полигоном для проведения радиоэкологических исследований поведения радионуклидов в природных условиях. В результате многочисленных научных исследований собраны уникальные сведения:

- о текущих уровнях загрязнения почв, донных отложений и воды водоемов, миграции радионуклидов [3,4];
- о накоплении радионуклидов различными видами растений и животных [5-7];
- об особенностях содержания радионуклидов в центральной части ВУГЗа, его западной и восточной перифериях [8].

Анализ и обобщение данных многолетних исследований позволили составить карты текущего уровня загрязнения, а также прогнозные карты загрязнения почв основными радионуклидами ВУРСа – ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs [8,9].

Последствия для здоровья населения, подвергшегося радиационному воздействию вследствие аварийных ситуаций, являются предметом специальных исследований по оценкам риска образования злокачественных новообразований (ЗНО), а также риска смерти от ЗНО на когорте ВУРСа [10,11]. Известно, что спустя несколько лет после каждой из аварий основным фактором радиационного воздействия на население является внутреннее облучение за счет ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. По прошествии 10 лет с момента кыштымской аварии на долю ⁹⁰Sr приходилось 98,8% от всего содержания радионуклидов в продуктах питания [12]. Исследования содержания радионуклидов в организме жителей уральского региона, включая территории зоны наблюдения ФГУП «ПО «Маяк», показали, что содержание ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs непрерывно снижается, и по состоянию на 2012 г. среднее содержание ¹³⁷Cs составляло порядка 100 Бк [13]. Современный уровень содержания радионуклидов в некоторых продуктах питания населения, проживающего по периметру ВУРСа, а также доза облучения критических групп представлены в работе [14]. В этой работе было отмечено превышение санитарного норматива по содержанию ⁹⁰Sr в молоке, однако превышений дозы в 1 мЗв/год не выявлено.

На общественно-доступных территориях, примыкающих к ВУРСу, и по сей день отмечаются повышенные уровни содержания техногенных радионуклидов в элементах окружающей среды [15,16]. Нахождение радионуклидов в почве приводит к дополнительному внешнему облучению лиц, находящихся на данной территории. Миграция нуклидов из почвы в растительность приводит к их накоплению в пище как растительного, так и животного происхождения, что в дальнейшем приводит к внутреннему облучению организма человека. Также радионуклиды могут переходить из поверхностного слоя почвы в воздух в результате ветровых нагузов или некоторых аварийных ситуаций, таких как пожар [17].

Для населения региона, ведущего жизнедеятельность на территориях с содержанием техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды выше глобального уровня, актуальным является вопрос о соблюдении норм радиационной безопасности. В данной работе рассматриваются радиационные риски, обусловленные наличием радионуклида ¹³⁷Cs в почве локальных участков вне территории ВУРСа для лиц, проживающих в населенных пунктах, прилегающих к озеру Куяш, на основе полевых измерений при неизвестном характере вертикального распределения удельной активности. Под радиационными рисками понимается эффективная доза, полученная в результате внешнего и внутреннего облучения населения.

Объект и методы исследования в зоне наблюдения ФГУП «ПО «Маяк»

Участок проведения полевых исследований расположен на берегу озера Куяш между двумя населенными пунктами Большой Куяш и Голубинка и представляет собой площадку размерами 250×250 м². Озеро Куяш расположено на восточной периферии ВУРСа и находится в зоне наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» (рис.1). Озеро удалено от главной оси следа на 14 км, на 22 км от места аварии 1957 г. и на 28 км от озера Карачай. Данная территория попала под воздействия как Кыштымской аварии, так и Карачаевского инцидента. На побережье озера расположены 3 населенных пункта с суммарным населением 1400 человек по состоянию на 2010 г. Согласно ретроспективным картам загрязнения почв ВУРСа и Карачаевского следа ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs на 1967 г. [9], рассматриваемая территория подверглась загрязнению 0,5–15 Ки/км² по ¹³⁷Cs и до 3 Ки/км² по ⁹⁰Sr. Отселения данных населенных пунктов не производилось.

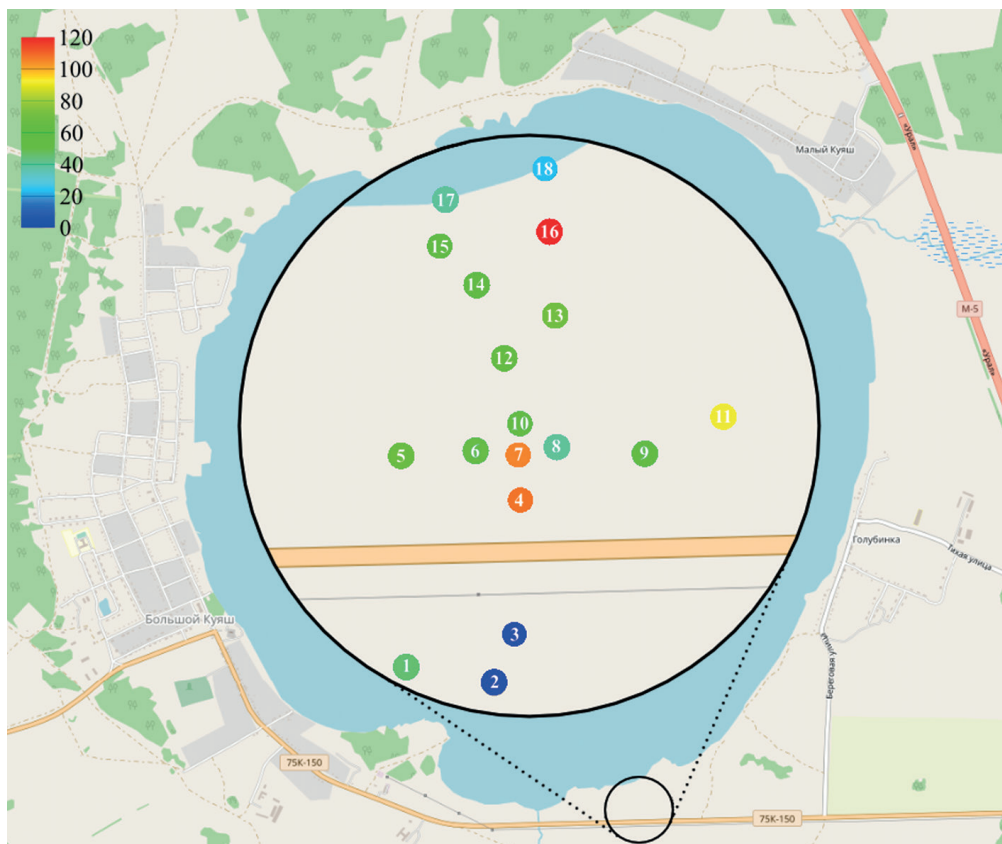


Рис 1.
Расположение
объекта
исследования.

Произведены полевые измерения удельной активности ¹³⁷Cs в почве южной части водоохранной зоны озера Куяш в 18 точках одного локального участка (рис.2). Для проведения исследований применялся переносной гамма-спектрометр МКС-АТ6101ДР (НПУП «АТОМТЕХ», г. Минск). Блок детектирования данного спектрометра выполнен на основе кристалла NaI:Tl размерами 63×63 мм. Данное средство измерения позволяет определять как поверхностную, так

Рис 2.

Схема расположения точек измерения и зафиксированное значение удельной активности, Бк/кг.



и удельную активность гамма-излучающих радионуклидов, а также мощность AMBIENTного эквивалента дозы (далее МАЭД). Диапазон регистрируемого гамма-излучения составляет от 50 кЭВ до 3 МэВ. В данном диапазоне энергий энергетическая зависимость чувствительности находится в пределах $\pm 20\%$. Спектрометр также оснащен GPS-приемником, что обеспечивает привязку полученных данных к географическим координатам.

На основе результатов полевых измерений удельной активности ^{137}Cs в почве составлена выборка данных с целью выявления формы распределения частоты повторяемости результатов. Статистический анализ выборки данных проведен с помощью тестов Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Уилка. Полученное распределение удельной активности ^{137}Cs позволило определить его статистические характеристики для последующей оценки радиационных рисков при облучении населения.

Потенциальное облучение от нахождения ^{137}Cs в почве локального участка может происходить при нахождении человека на самом участке, использовании участка для производства продуктов питания, на удалении от него при переносе активности с облаком пыли, поднятом с поверхности участка. В данной работе рассматриваются пять сценариев облучения жителей, находящихся в районе расположения озера Куяш:

- 1) внешнее облучение на обследованном участке от поверхности почвы, содержащей ^{137}Cs ;
- 2) внутреннее облучение за счет поступления ^{137}Cs с пищей, условно произведенной на обследованном участке;
- 3) внутреннее облучение при ингаляции радиоактивной пыли из облака, сформированного вторичным ветровым подъемом;

4) внешнее облучение жителей населенных пунктов Голубинка, Большой Куяш и Малый Куяш от облака пыли, сформированного ветровым подъемом ^{137}Cs с поверхности обследованного участка;

5) внутреннее облучение жителей населенных пунктов Голубинка, Большой Куяш и Малый Куяш от облака пыли, сформированного ветровым подъемом ^{137}Cs с поверхности обследованного участка.

Расчет эффективных доз в сценариях 4) и 5) выполнен для условий переноса облака пыли, сформированного ветровым подъемом ^{137}Cs с поверхности обследованного участка на расстояниях 1860, 3300 и 4100 метров до расположения центров населенных пунктов Голубинка, Большой Куяш и Малый Куяш соответственно.

В представленном исследовании формирование вторичного ветрового подъема рассматривается только в теплый период года, а именно в период отсутствия снежного покрова и замерзания почвы. Для рассматриваемого участка продолжительность теплого периода составляет в среднем 210 суток в год [18].

В сценарии облучения 1) эффективная доза внешнего облучения от загрязненной поверхности, обусловленная наличием радионуклида в почве $E_{нов}$, рассчитывается по формуле:

$$E_{нов} = A_s R_{нов} t_n, \quad (1)$$

где A_s – поверхностная активность ^{137}Cs , Бк/м²; $R_{нов} = 5,01 \cdot 10^{-16}$ Зв·м²/(Бк·с) – коэффициент дозового преобразования для ^{137}Cs при внешнем облучении от поверхности источника; t_n – время нахождения на рассматриваемой территории, с.

Время нахождения полагаем равным 1 году, то есть $3,15 \cdot 10^7$ секунд.

В сценарии облучения 2) эффективная доза внутреннего облучения за счет поступления радионуклида с пищей рассчитывается по формуле:

$$E_{пищ} = A_s R_{пищ} \sum_n U_n K_n, \quad (2)$$

где A_s – поверхностная активность ^{137}Cs в почве, Бк/м²; $R_{пищ} = 1,3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк – коэффициент дозового преобразования для ^{137}Cs при поступлении с пищей; U_n – годовое потребление пищевых продуктов n , кг или л; K_n – нормированный на продуктивность коэффициент накопления «отложение на почве – содержание в продуктах питания» по корневому пути, м²/кг или м²/л.

В сценарии облучения 2) при определении эффективной дозы за счет пищевого поступления рассматриваются следующие продукты питания: мясо, овощи (картофель) и молочные продукты; значения коэффициентов K_n для этих продуктов приведены в табл.1. Информация о потреблении этих продуктов была взята из данных Челябинскстата [19]. При этом считается, что все потребляемые продукты являются продуктами местного производства.

В полевых исследованиях проводилось измерение удельной активности A_m ^{137}Cs в почве. Консервативная оценка поверхностной активности A_s по измеренной удельной активности производится согласно формуле [15]:

$$A_s = \frac{A_m \rho v d^2}{1 - e^{-vd}}, \quad (3)$$

Табл.1. Значения нормированных на продуктивность коэффициентов накопления «отложение на почве – содержание в продуктах питания» K_n .

Продукт питания	Мясные продукты	Молочные продукты	Овощи
K_n	$1,8 \cdot 10^{-4}$ м ² /кг	$4,1 \cdot 10^{-4}$ м ² /кг	$1,2 \cdot 10^{-4}$ м ² /кг

где $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$ – плотность почвы; $d = 0,1 \text{ м}$ – максимальная глубина регистрации радионуклида; $\nu = 12 \text{ м}^{-1}$ – параметр, определяющий вертикальное распределение радионуклида.

Внутреннее облучение на обследованном участке в теплый период года за счет ингаляционного поступления радиоактивной пыли, содержащей ^{137}Cs , рассчитывается по формуле:

$$E^{yh}_{обл} = A_s K_{ВП} R_{инг} U_{инг} t_n, \quad (4)$$

где $K_{ВП}$ – коэффициент вторичного ветрового подъема; $R_{инг} = 4,6 \cdot 10^{-9} \text{ Зв/Бк}$ – коэффициент дозового преобразования для ^{137}Cs при поступлении с воздухом; $U_{инг} = 2,57 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ – интенсивность дыхания.

Для оценки значения коэффициента вторичного ветрового подъема была использована формула [20]:

$$K_{ВП} = K_1 e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda)t} + K_2 e^{-(\lambda_2 + \lambda)t}, \quad (5)$$

где $K_1 = 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ – коэффициент, описывающий раннюю стадию процесса; $K_2 = 10^{-9} \text{ м}^{-1}$ – коэффициент, описывающий позднюю стадию процесса; $\lambda_1 = 0,0126 \text{ сут}^{-1}$ – постоянная уменьшения коэффициента вторичного ветрового подъема в раннюю стадию; $\lambda_2 = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ – постоянная уменьшения коэффициента вторичного ветрового подъема в позднюю стадию; $\lambda = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ – постоянная радиоактивного распада ^{137}Cs ; $t = 20440 \text{ сут.}$ – время, прошедшее с момента образования отложения.

В сценариях 4) и 5) оценки внешнего облучения $E^j_{обл}$ и внутреннего $E^j_{инг}$ от облака пыли, поднятого с обследованного участка, эффективная доза, обусловленная взвешенным в приземном слое радионуклидом, рассчитывается по формулам:

$$E^j_{обл} = C^j(x) R_{обл}, \quad (6)$$

$$E^j_{инг} = C^j(x) R_{инг} U_{инг}, \quad (7)$$

где $C^j(x)$ – временной интеграл объемной активности ^{137}Cs в приземном слое атмосферы на расстоянии x от источника, $\text{Бк} \cdot \text{с}/\text{м}^3$; j – индекс градации устойчивости атмосферы (А, В, С, D, Е, F) в параметризации Пасквилла-Гиффорда; $R_{обл} = 3,52 \cdot 10^{-14} \text{ Зв} \cdot \text{м}^3/(\text{Бк} \cdot \text{с})$ – коэффициент дозового преобразования для ^{137}Cs при внешнем облучении от радиоактивного облака.

Временной интеграл объемной активности ^{137}Cs в приземном слое атмосферы на расстоянии x от источника рассчитывается по формуле:

$$C^j(x) = QG^j(x), \quad (8)$$

где Q – суммарная активность радионуклида в выбросе, Бк; $G^j(x)$ – фактор разбавления радионуклида в приземном слое атмосферы на расстоянии x от источника, $\text{с}/\text{м}^3$.

Расчет суммарной активности в выбросе произведем по формуле [17]:

$$Q = c_{mp} \rho_{\theta} u_{\theta n} A_m S_{ист} t_{\theta n} B \times \exp\left(-\alpha \left(\frac{u_k^2}{u_{\theta n}^2} - 1\right)\right), \quad (9)$$

где $t_{\theta n}$ – длительность ветровой нагрузки, с; A_m – удельная активность радионуклида, Бк/кг; $u_{\theta n}$ – скорость ветра, м/с; $S_{ист} = 6,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ – площадь источника выброса; $u_k = 5 \text{ м/с}$ – критическая скорость ветра; $c_{mp} = 7,8 \cdot 10^{-3}$ – коэффициент трения; $\rho_{\theta} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; $B = 45$ – параметр массообмена; $\alpha = 9$ – эмпирический коэффициент.

Фактор разбавления радионуклида в приземном слое атмосферы рассчитывается по формуле:

$$G^j(x) = \int_{-a}^a \frac{F(x)}{\sqrt{2\pi}\sigma_z^j(x-\xi)4ua^2} G(z, x-\xi) \times \text{erf}\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma_y^j(x-\xi)}\right) d\xi, \quad (10)$$

где $a = 125$ м – половина стороны площадного источника; $F(x)$ – функция истощения облака; $G(z, x-\xi)$ – фактор вертикальной дисперсии; erf – функция ошибок; $\sigma_z^j(x)$ и $\sigma_y^j(x)$ – коэффициенты дисперсии; ξ – переменная интегрирования.

Для оценки, в силу малой удаленности рассматриваемых населенных пунктов от потенциального места выброса, положим $F(x) = 1$.

Фактор вертикальной дисперсии рассчитывается по формуле:

$$G(z, x-\xi) = \sum_{n=-2}^2 \exp\left(-\frac{(2nH_{mix} + (H-z))^2}{2\sigma_z^j(x-\xi)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(2nH_{mix} + (H+z))^2}{2\sigma_z^j(x-\xi)^2}\right), \quad (11)$$

где $H = 0,05$ м – эффективная высота выброса; $H_{mix} = 100$ м – высота слоя перемешивания; $z = 1$ м – переменная, характеризующая высоту над поверхностью земли.

Уровень консервативности полученных значений эффективной дозы по формулам (1),(2), (6),(7) в случае реализации рассмотренных сценариев можно оценить в сравнении с результатами расчета эффективной дозы на основе реальных данных производственного радиационного контроля объектов окружающей среды и продуктов питания [21]. Данные об удельной активности ^{137}Cs в продуктах питания и значения его объемной активности в приземном слое атмосферы позволяют рассчитать эффективные дозы потенциального облучения, обусловленные его наличием в продуктах питания и воздухе по формулам:

$$E_{пищ} = R_{пищ} \sum_n U_n A_n, \quad (12)$$

$$E_{обл} = A_v R_{обл} t_n, \quad (13)$$

$$E_{инг} = A_v R_{инг} U_{инг} t_n, \quad (14)$$

где A_n – удельная активность ^{137}Cs в продукте питания n , Бк/кг; A_v – объемная активность ^{137}Cs в приземном слое воздуха, Бк/м³.

Остальные параметры формул (12)-(14) применяются аналогично описанным выше.

Результаты полевых инструментальных исследований

Результаты полевых исследований показали относительно низкий уровень содержания ^{137}Cs в почве. Так, максимальное зафиксированное значение составило 118 Бк/кг, в то время как значение минимально значимой удельной активности для данного нуклида составляет 10 кБк/кг [22]. Также отмечена явная неравномерность загрязнения исследуемого участка. Наряду с техногенным ^{137}Cs , во всех точках измерений были определены значения удельной активности естественных радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Содержание данных радионуклидов в почве не превышает 649, 29,3 и 17,9 Бк/кг соответственно. Полученные значения удельной активности A_m ^{137}Cs и мощности амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$ во всех точках измерений приведены в табл.2.

Результаты измерения удельной активности ^{137}Cs в точках 2 и 3 исключены из статистической обработки. Для обследуемой территории предполагается непрерывность функции плотности выпавшей активности [23]. Отсутствие детектируемого значения удельной активности ^{137}Cs в этих двух точках может быть вызвано рядом причин: завезенным грунтом, перемешанным верхним слоем, перемещением активности в более глубокие горизонты и т. д. Игнорирование результатов измерения в точках 2 и 3 не приводит к необоснованному занижению оценки радиационного воздействия.

Табл.2. Значения удельной активности A_m и МАЭД $H^*(10)$ в рассматриваемых точках.

№	Координаты точки		Тип ландшафта	Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг	МАЭД, мкЗв/ч
	N	E			
1	55°49'04''	61°08'27''	Поле	44,3±9,0	0,071
2	55°49'04''	61°08'30''	Поле	Ниже НПИ	0,070
3	55°49'05''	61°08'31''	Поле	Ниже НПИ	0,059
4	55°49'08''	61°08'32''	Поле	105,0±21,0	0,095
5	55°49'09''	61°08'27''	Поле	64,1±13,0	0,075
6	55°49'09''	61°08'29''	Поле	50,2±10,5	0,071
7	55°49'09''	61°08'31''	Поле	104,0±21,0	0,092
8	55°49'09''	61°08'33''	Поле	39,0±8,4	0,061
9	55°49'09''	61°08'36''	Поле	51,1±10,5	0,064
10	55°49'09''	61°08'31''	Поле	54±12,2	0,076
11	55°49'09''	61°08'39''	Лес	89,1±18,3	0,067
12	55°49'11''	61°08'31''	Поле	62,0±14,0	0,074
13	55°49'12''	61°08'33''	Поле	69,0±14,0	0,070
14	55°49'12''	61°08'30''	Поле	57,6±12,6	0,069
15	55°49'13''	61°08'29''	Поле	40,5±8,8	0,060
16	55°49'13''	61°08'33''	Поле	118,0±24,0	0,085
17	55°49'14''	61°08'30''	Берег озера	26,0±9,1	0,057
18	55°49'14''	61°08'33''	Берег озера	26,2±6,5	0,057

Статистический анализ сформированной выборки данных об удельной активности ^{137}Cs в почве показал, что значения факторов P для тестов Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Уилка превосходят величину 0,05 и, следовательно, распределение результатов измерений может рассматриваться как нормальное. Установленная форма распределения позволила статистически обоснованно применять в расчетах радиационного воздействия среднее значение удельной активности ^{137}Cs , равное 62,5 Бк/кг. Установленное среднее значение удельной активности позволяет получить (3) консервативное значение поверхностной активности в верхнем слое почвы толщиной 10 см, которое составляет 15,0 кБк/м².

Результаты оценки эффективной дозы

Расчеты по формуле (1) показали, что реализация сценария 1) – постоянное пребывание человека на участке с удельной активностью почвы 62,5 Бк/кг – приведет к внешнему облучению от поверхности не более 237 мкЗв/год или 24% от предела годового облучения населения. Оценка эффективной дозы потенциального облучения по формуле (2), в случае реализации сценария 2), при поступлении ^{137}Cs с пищей, выращенной и/или произведенной на обследованном участке, не превысит 22 мкЗв/год или 2,2% от предела годового облучения населения. Полученные величины эффективной дозы в ситуациях облучения 1) и 2) не зависят от площади участка.

При реализации сценария 3) ожидаемая годовая эффективная доза внутреннего облучения от ингаляции ^{137}Cs не превысит величины 0,1 нЗв. Реализация сценариев 4) и 5) рассмотрена для шести категорий устойчивости атмосферы (А, В, С, D, E, F) в параметризации Пасквилла-

Табл.3. Результаты расчетов эффективных доз за счет ветрового подъема радиоактивной пыли в ближайших населенных пунктах при экстремальных ветровых нагрузках.

Способ облучения	Населенный пункт		
	Голубинка	Б. Куяш	М. Куяш
Внутреннее ($E_{инг}$), нЗв	9,38	4,33	3,24
Внешнее ($E_{обл}$), нЗв	0,28	0,13	0,10

Табл.4. Результаты расчетов эффективных доз за счет ветрового подъема радиоактивной пыли в ближайших населенных пунктах при среднегодовых ветровых нагрузках.

Способ облучения	Населенный пункт		
	Голубинка	Б. Куяш	М. Куяш
Внутреннее ($E_{инг}$), нЗв	1,44	0,67	0,50
Внешнее ($E_{обл}$), нЗв	0,043	0,020	0,015

Гиффорда. Установлено, что максимальные значения ожидаемой эффективной дозы от внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радионуклидов и внешнего облучения от радиоактивного облака поднятой пыли реализуются при категории устойчивости атмосферы F и максимально возможной скорости ветра. Согласно данным метеостанции Аргаяш, в период с 01.01.2018 по 01.01.2023 гг.

в теплое время года был однократно зафиксирован порыв ветра скоростью 38 м/с за трехчасовой период между наблюдениями [24]. На основании этого в расчетах продолжительность экстремальной ветровой нагрузки выбрана равной 3 часам.

Результаты расчетов эффективных доз приведены за счет ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности исследуемого участка при скорости ветра 38 м/с и при среднегодовом распределении скоростей ветра – табл.3 и 4 соответственно.

В табл.3, 4 представлены результаты внутреннего и внешнего облучения от облака пыли, поднятой с обследованного участка площадью $6,25 \cdot 10^{-2}$ км². Для реализации пренебрежимо малых радиационных рисков, соответствующих годовой эффективной дозе 10 мкЗв, площадь участка с установленной поверхностной активностью ¹³⁷Cs 15,0 кБк/м² должна быть увеличена от 3000 до 9000 раз, что на практике нереализуемо.

Таким образом, максимально возможное значение ожидаемой эффективной дозы при реализации сценариев 4) и 5) при ветровом подъеме радиоактивной пыли с поверхности исследуемого участка достигает 11 нЗв/год или 0,0011% от предела годового облучения населения.

Таким образом, ни в одном из рассматриваемых сценариев ожидаемая годовая эффективная доза, обусловленная наличием в почве ¹³⁷Cs, не превосходит годовой предел дозы от техногенных источников для населения, который равен 1 мЗв. Более того, если учитывать реализацию четырех сценариев одновременно, то и в данном случае полученная консервативная оценка эффективной дозы не превысит 26% от установленного годового предела дозы для населения.

Для оценки степени консерватизма вышеизложенных результатов оценки радиационных рисков при реализации рассмотренных четырех сценариев выполнен расчет радиационного облучения населения рассматриваемых населенных пунктов по результатам производственного радиационного контроля объектов окружающей среды и продуктов питания в зоне наблюдения ФГУП «ПО «Маяк». Согласно данным отчета по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк» за 2021 г., на территории, входящей в зону наблюдения организации, зафиксированы следующие уровни загрязнения ¹³⁷Cs [21]:

- объемная активность в п. Метлино, расположенном в непосредственной близости от о. Куяш, не превышает 0,3 мБк/м³;

- поверхностная активность на периферии зоны наблюдения – до 6 кБк/м²;
- содержание в продуктах питания: до 1,4 Бк/кг в молоке, до 0,27 Бк/кг в картофеле и до 8 Бк/кг в печени говяжьей.

Консервативно данные по содержанию ¹³⁷Cs в печени говяжьей приняты для содержания этого радионуклида во всех видах мясной продукции.

Оценка эффективной дозы на основании представленных исходных данных, выполненная по формулам (12)-(14) и (1), показала, что за 1 год облучение составит:

- 12,41 мкЗв от перорального поступления ¹³⁷Cs с пищей при условии, что вся потребляемая пища имеет вышеупомянутое содержание ¹³⁷Cs;
- 0,33 нЗв от содержания ¹³⁷Cs в воздухе за счет внешнего облучения;
- 11,1 нЗв от содержания ¹³⁷Cs в воздухе за счет ингаляционного поступления;
- 95 мкЗв за счет облучения от поверхности почвы, содержащей ¹³⁷Cs.

Величины эффективных доз, полученные из данных экологического отчета, в случае облучения с поверхности почвы и поступления с пищей оказались соразмерны с рассчитанными для рассматриваемой ситуации, а эффективные дозы от содержащегося в воздухе ¹³⁷Cs оказались соизмеримы с дозами, обусловленными ветровым подъемом данного радионуклида с рассматриваемой площадки при скорости ветра 38 м/с в течение 3 часов.

Заключение

В настоящей работе выполнена оценка ожидаемой эффективной дозы, которую могут получить жители населенных пунктов, прилегающих к озеру Куяш за счет присутствия установленных уровней ¹³⁷Cs в почве прибрежных участков. Расчеты проводились на основе результатов полевых измерений при неизвестном характере вертикального распределения удельной активности. Рассматривались маловероятные, но экстремальные условия четырех сценариев облучения, при которых достигается максимально возможное радиационное воздействие. Сценарии предусматривали как внешнее, так и внутреннее облучение от нахождения ¹³⁷Cs в почве, включая пищевые цепочки, радиационное воздействие сформированного облака пыли при ветровом подъеме с поверхности рассматриваемого участка, длительное нахождение человека на обследованном участке.

Консервативные оценки показали, что наибольший вклад может сформировать внешнее облучение за счет постоянного пребывания человека на исследуемом участке в течение года. В этом случае годовая эффективная доза не превысит 237 мкЗв/год.

Формирование на 100% продуктовой корзины из продуктов питания, произведенных на почве данного участка, не приведет к облучению выше 22 мкЗв/год. Пищевая цепочка в расчетах включала овощи, фрукты, мясо-молочную продукцию, полученную на фураже с данного участка.

В случае ветрового подъема пыли с рассматриваемого участка облучение населения не превысит 12 нЗв/год. При оценке последствий ветрового подъема в качестве источника выброса рассматривался относительно небольшой участок общей площадью 65000 м².

Все гипотетические сценарии экстремально возможного радиационного облучения населения от наличия ¹³⁷Cs в почве локального участка прибрежной зоны озера Куяш с поверхностной активностью 15,0 кБк/м² не приводят к превышению установленного годового предела дозы. При этом годовой предел дозы для населения не был превышен ни при отдельной, ни при совместной реализации рассмотренных сценариев облучения.

Полученные консервативные оценки по порядку величин совпадают с оценкой дозы по данным производственного радиационного контроля объектов окружающей среды и продуктов питания ФГУП «ПО «Маяк», но кратно выше по причине выбора маловероятных условий облучения.

Произведенная консервативная оценка позволяет сделать обоснованный вывод о безопасности нахождения людей на данной территории и отсутствии необходимости в ограничении видов ее использования. Для детализации оценки радиационного воздействия в рассматриваемом районе необходимо увеличить площадь исследования, а также учесть наличие ^{90}Sr на данной территории.

Полученные результаты могут быть уточнены при дополнительных исследованиях профиля распределения активности ^{137}Cs по глубине, состава и типа почвы обследованного участка, так как принятые условия (установленные настройки средства измерений) автоматического расчета удельной активности могут существенно отличаться от реальных условий обследованного участка.

Авторский коллектив выражает благодарность всем участникам экспедиций, а также агентству экологической безопасности «Альфа-Х91» за оказание помощи в транспортировке полевого отряда и предоставлении полевых средств измерения.

Литература

1. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В. Радиоактивные беды Урала. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2000. 94 с.
2. Подтесов Г.Н., Аклеев А.В., Даванко А.Ю. Челябинская область: ликвидация последствий радиационных аварий. Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 2006. 344 с.
3. Казаченок Н.Н., Костюченко В.А., Попова И.Я и др. Современные уровни радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды ВУРС и других территорий в зоне влияния ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2014. № 1(73). С. 33-48.
4. Молчанова И.В., Караваева Е.Н. Эколого-геохимические аспекты миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2001. 160 с.
5. Позолотина В.Н., Антонова Е.В., Каримуллина Э.М и др. Последствия хронического действия радиации для флоры Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49, № 1. С. 97-106.
6. Молчанова И.В., Михайловская Л.Н., Позолотина В.Н., Антонова Е.В. Техногенные радионуклиды в почвах восточно-уральского радиоактивного следа и их накопление растениями различных таксономических групп // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 1. С. 77-84.
7. Стариченко В.И. Аккумуляция ^{90}Sr в костной ткани обыкновенной слепушонки из головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Экология. 2011. № 1. С. 57-63.
8. I. Molchanova, L. Mikhailovskaya, K. Antonov et al. «Current assessment of integrated content of long-lived radionuclides in soils of the head part of the east ural radioactive trace», *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 138, pp. 238-248, 2014.
9. Израэль Ю.А. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2013. 140 с.
10. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа населения за 1957–2014 гг. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 4. С. 58-64.

11. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Сравнительный анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на реке Теча и Восточно-Уральском радиоактивном следе // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2017. Т. 26, № 1. С. 100-114.
12. Костюченко В.А., Казаченок Н.Н., Перемыслова Л.М. и др. Современный этап развития Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вопросы радиационной безопасности. 2013. № 5. С. 46-52.
13. Дегтева М.О., Толстых Е.И., Суслова К.Г. и др. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей уральского региона // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 30-39.
14. Кравцова О.С., Брук Г.Я., Голиков В.Ю. и др. Радиационная обстановка на территориях Уральского федерального округа, находящихся в зоне влияния ПО «Маяк» // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2012. № 5(230). С. 6-11.
15. Носовец В.С., Мищенко Л.А., Миргородских К.С. и др. Опыт независимого радиационного контроля на общественно доступных участках зоны наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2022. № 1(105). С. 3-10.
16. Селезнев А.А., Горчаков Д.А., Кузнецов Н.Н. и др. Современное состояние загрязнения радионуклидом Cs-137 северной части Восточно-Уральского радиоактивного следа // АНРИ. 2010. № 4 (63). С. 48-53.
17. Мызникова О.Г., Панченко С.В., Уткин С.С. Оценка опасности ветрового выноса радиоактивных веществ с береговой линии промышленных водоемов ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 2(62). С. 56-66.
18. Тетерин А.Ф. Эколого-климатические особенности зоны Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 368 с.
19. Качество питания населения Челябинской области // 74.rosstat.gov.ru: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Челябинской области. URL: <https://chelstat.gks.ru/storage/mediabank/пресс-релиз%20качество%20питания.pdf> (дата обращения 18.01.2023).
20. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
21. Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк» за 2021 год // po-mayak.ru: ФГУП «ПО «Маяк». URL: https://www.po-mayak.ru/local/ОТЧЕТ_2021.pdf (дата обращения: 25.01.2023).
22. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
23. Грубич А.О. Загрязнение почвы атмосферными выпадениями. Статистические свойства. Минск: ИВЦ Минфина, 2017. 230 с.
24. Архив погоды в Аргаяше // гр5.ru: Расписание погоды. URL: https://гр5.ru/Архив_погоды_в_Аргаяше (дата обращения 28.04.2023).

Radiation Exposure in Territories with Increased Content of Caesium-137 in Soil

Zigangirov Artur¹, Makeeva Ekaterina¹, Ekidin Alexey²

¹ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

² Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The article presents a conservative assessment of the values of the effective dose received by residents of settlements located in the observation zone of Mayak Production Association. Data on the content of ¹³⁷Cs were obtained in the course of field instrumental studies. The average value of the specific activity of ¹³⁷Cs was 62,5 Bq/kg, which corresponds to an average surface activity of 15,0 kBq/m² for a soil layer of 10 cm. The results showed that the annual dose limit for the population from the existing level of ¹³⁷Cs is not exceeded either with a separate or with a joint implementation of radiation scenarios.

Key word: radionuclides, soil, specific activity, wind erosion, effective dose, environment, monitoring area.

А.Р.Зигангиров¹, Е.С.Макеева¹, А.А.Екидин²

*¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*

² Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Контакты: e-mail – katya.makeeva.0411@bk.ru