

ИНГАЛЯЦИОННОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ ТРАНСУРАНОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОРГАНИЗМ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

¹ Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (Республика Беларусь, г. Хойники, ул. Терешковой, д. 7);

² Гомельский государственный медицинский университет (Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Ланге, д. 5)

Актуальность. Любые работы, проводимые на территории радиоактивного загрязнения, должны осуществляться с обязательным индивидуальным дозиметрическим контролем участников по всем путям облучения. Однако в настоящее время контроль облучения персонала через органы дыхания не проводится в связи с отсутствием методического и технического обеспечения.

Цель – оценить дозы облучения персонала, ожидаемые в результате ингаляции трансураниевых элементов при пожарах в белорусском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.

Методология. Объектами исследований являются частицы аэрозолей с содержанием ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu и ²⁴¹Am, образующиеся в результате высокотемпературной возгонки и горения лесных материалов. Предметом исследований являются дозы облучения персонала в результате ингаляционного поступления ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu и ²⁴¹Pu во время тушения пожаров.

Результаты и их анализ. Оценены ожидаемые дозы внутреннего облучения участников тушения пожаров в белорусском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС за счет ингаляционного поступления трансураниевых элементов. Оценки проводились как по результатам прямых измерений объемной активности радионуклидов в зоне дыхания участников пожаротушения, так и расчетным методом. Показано, что вклад ¹³⁷Cs в «ингаляционную» дозу облучения персонала может составлять только 1%. Установлено, что в белорусском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС вклад трансураниевых элементов в ожидаемую эффективную дозу внутреннего облучения составляет около 60%. Дозы облучения персонала, ожидаемые в результате ингаляционного поступления радионуклидов, не превышали 0,1 мЗв/год, что значительно меньше контрольного уровня, установленного в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике для персонала (5 мЗв/год).

Заключение. Предложенные методы позволяют консервативно оценивать ожидаемые ингаляционные дозы облучения персонала в случае тушения пожаров в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, а также обеспечить их учет при проведении индивидуального дозиметрического контроля.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, пожар, зона отчуждения, Чернобыльская АЭС, ингаляция, радионуклид, доза облучения.

Введение

Из 3 зон отчуждения, откуда эвакуировано население и где прекращена традиционная хозяйственная деятельность (на территории восточно-уральского радиоактивного следа, вокруг поврежденных реакторов Чернобыльской и Фукусимской АЭС), 30-километровая зона Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) является самой опасной вследствие загрязнения α -излучающими долгоживущими радионуклидами. Выпавшие на почву ²⁴¹Am, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu практически не вносят вклад в дозу внешнего облучения и не поступают корневым путем в растения и далее в продукты питания растительного происхождения, а через корма – в пищевую продукцию животного про-

исхождения. Однако при пожарах в результате подъема радионуклидов в зону дыхания происходит формирование доз внутреннего облучения ингаляционным путем. На участках зоны отчуждения с высоким уровнем загрязнения трансураниевыми элементами и ⁹⁰Sr вклад ингаляционного поступления радионуклидов в дозу облучения персонала может превышать все остальные пути облучения при некоторых видах работ.

Любые мероприятия, проводимые на загрязненной радионуклидами территории, должны осуществляться с обязательным индивидуальным дозиметрическим контролем участников [5, 9]. На текущий момент оцениваются только дозы внешнего облучения

✉ Буздалкин Константин Николаевич – канд. техн. наук доц., зав. лаб. пробл. дозиметрии, Полесский гос. радиационно-экологич. заповедник (Беларусь, 247618, г. Хойники, ул. Терешковой, д. 7), e-mail: buzdalakin@tut.by;

Бортновский Владимир Николаевич – канд. мед. наук доц., зав. каф. общ. гигиены, экологии и радиац. медицины, Гомельский гос. мед. ун-т (Беларусь, 246000, г. Гомель, ул. Ланге, д. 5), e-mail: kafog2@mail.ru

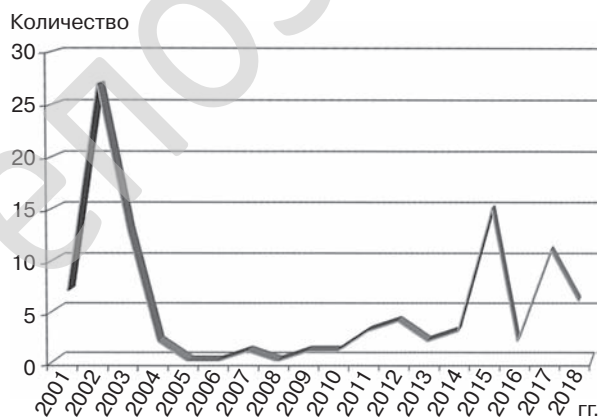
персонала и содержание в организме ^{137}Cs , а контроль облучения персонала в результате поступления ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{90}Sr и ^{137}Cs через органы дыхания не проводится в связи с отсутствием методического и технического обеспечения не только в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике, но и в других организациях, осуществляющих деятельность в зоне отчуждения ЧАЭС [1–4].

Проблема индивидуального дозиметрического контроля заключается в том, что для оценки объемной активности воздуха, на основе которой рассчитываются ожидаемые дозы внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов, необходимо в течение нескольких дней проводить радиохимическое выделение трансурановых элементов из отобранных проб аэрозолей, а также требуется специальное оборудование для отбора проб загрязненного воздуха [4]. Такая «оперативность», например во время пожара, не позволяет нормировать продолжительность смены, принимать адекватные решения по применению индивидуальных средств защиты органов дыхания и других мер.

Цель – оценить дозы облучения персонала, ожидаемые в результате ингаляции трансурановых элементов при пожарах в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС.

Материал и методы

В среднем на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, который является белорусским сектором зоны отчуждения ЧАЭС, возникали 5 пожаров в год (рисунок). Глобальное изменение климата не дает оснований надеяться на снижение количества и интенсивности пожаров.



Количество пожаров в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС.

При горении и тлении горючих материалов за счет образования золы происходит формирование мелкодисперсного радиоактивного аэрозоля. Также имеет место высокотемпературная утечка радионуклидов из лесной подстилки и слоя войлока из неминерализовавшихся трав с их конденсацией на различных носителях. При указанных процессах в воздух поступают частицы, в состав которых входят или на которых конденсируются радионуклиды. Радиоактивные аэрозоли с частицами размером 0,1–10,0 мкм переносятся в атмосфере. Объектами исследований являлись частицы аэрозолей с содержанием ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{241}Am , образующиеся в результате высокотемпературной возгонки и горения лесных материалов.

Предметом исследований стали дозы облучения персонала в результате ингаляционного поступления ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Pu во время тушения пожаров. Крупные частицы радиоактивных аэрозолей размером более 1 мкм осаждаются в трахее, бронхах и быстро выводятся из организма, а субмикронные – проникают в альвеолы легких и длительное время находятся в организме [7, 8].

Основная масса трансурановых элементов выпала на территорию зоны отчуждения в матрице топливных частиц (в топливном компоненте радиоактивных выпадений), которые образовались в результате диспергирования ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС во время взрыва и после окисления его в воздухе [8]. Соотношение $^{238}\text{Pu} : ^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} : ^{241}\text{Pu}$ в суммарном выбросе аварийного блока ЧАЭС с 26 апреля по 5 мая 1986 г. можно оценить как 1,1 : 1,0 : 1,5 : 200,0 [6]. В 2016 г. соотношение между активностями радионуклидов в топливном компоненте $^{238}\text{Pu} : ^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} : ^{241}\text{Am}$ составляло 1,2 : 1,0 : 1,5 : 4,9 [7]. Периоды полураспада указанных радионуклидов составляют 88, 24 100, 6540 и 432 года соответственно.

Приведенные сведения позволили на основании данных о плотности загрязнения территории одним радионуклидом топливного компонента чернобыльских радиоактивных выпадений оценивать плотность загрязнения другими трансурановыми элементами в этой же точке на любой момент времени. Уровни загрязнения объектов окружающей среды трансурановыми элементами изменяются с течением времени: изотопами плутония падают, а ^{241}Am растут в связи с β -распадом ^{241}Pu (период полураспада ^{241}Pu 14,4 года).

Соотношения между активностями трансураниевых элементов в топливных радиоактивных выпадениях будут соответствовать отношениям их удельных активностей в облученном ядерном топливе на конкретный момент времени.

Распределение ^{90}Sr по территории белорусского сектора зоны отчуждения ЧАЭС определяли топливным компонентом, однако, вклад в этот процесс конденсационного компонента чернобыльских радиоактивных выпадений был также значителен. Утечка летучего высокоподвижного ^{137}Cs происходила в основном при высокотемпературном отжиге ядерного топлива с последующей конденсацией на различных носителях [8]. Эти процессы привели к иному распределению ^{90}Sr и ^{137}Cs по территории радиоактивного загрязнения. Удельное содержание в пробах почвы ^{90}Sr и ^{137}Cs определялось с использованием β - γ -спектрометра с органическим и сцинтилляционным детекторами соответственно. Таким образом, были исключены трудоемкие процедуры подготовки проб к испытаниям радиохимическими методами.

Оценку проводили как по результатам измерений объемной активности радионуклидов в зоне дыхания участников пожаротушения, так и расчетным методом, который не требовал длительного радиохимического выделения и осаждения трансураниевых элементов в лабораторных условиях с применением дорогостоящих ионообменных смол, α -спектрометрического окончания.

Измерения объемной активности радионуклидов проводили в 2015 г. при масштабном пожаре на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника [4]. Отбор проб радиоактивных аэрозолей выполняли с использованием переносного расходомера-пробоотборника радиоактивных газоаэрозольных смесей ПУ-5 (производитель ООО «НТЦ «Амплитуда»», Россия). В качестве фильтрующего материала использовали АФА-РСР-20.

Другим способом оценки объемной активности радионуклидов, в том числе трансураниевых элементов, являлся расчетный. Объемную активность i -го радионуклида в зоне дыхания участников пожаротушения ρ_i ($\text{Бк} \cdot \text{м}^{-3}$) оценивали по формуле:

$$\rho_i = k_i \cdot \sigma_i, \quad (1)$$

где k_i – коэффициент подъема (ресуспензии) i -го радионуклида, м^{-1} ;

σ_i – плотность загрязнения территории i -м радионуклидом, $\text{Бк} \cdot \text{м}^{-2}$.

Плотность загрязнения территории – один из основных факторов, определяющих ожидаемые дозы облучения персонала от поступления радионуклидов ингаляционным путем. Загрязнение территории зоны отчуждения ЧАЭС ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Pu с достаточной точностью оценивали по плотности загрязнения ^{241}Am , которую оперативно измеряли по удельной активности проб почвы «аппаратным методом» с использованием γ -спектрометра с детектором на основе высокоочищенного германия с углеродным окном. Продолжительность измерения проб почвы, отобранных на территории зоны отчуждения ЧАЭС, как правило, не превышала 4 ч (при статистической погрешности оценки площади пика полного поглощения γ -линии ^{241}Am менее 15%).

Для оперативной оценки плотности загрязнения территории в случае пожаров и иных чрезвычайных ситуаций использовали карты загрязнения (при их наличии). В этом случае отбор проб и измерения не проводили, а использовали приближенное значение, указанное на карте. Погрешностью оценки плотности загрязнения пренебрегали, так как неопределенность коэффициентов подъема радионуклидов, а также дозовых коэффициентов, используемых для оценки ожидаемых доз облучения, была на порядок выше.

Индивидуальные эффективные дозы облучения персонала E_{ing} (Зв), ожидаемые в результате ингаляционного поступления радионуклидов, оценивали с использованием выражения:

$$E_{\text{ing}} = \sum [e(g)_i \cdot \rho_i] \cdot v \cdot t, \quad (2)$$

где $e(g)_i$ – дозовый коэффициент, равный ожидаемой эффективной дозе, обусловленной ингаляционным поступлением 1 Бк i -го радионуклида в организм в зависимости от возраста человека, с учетом процессов метаболизма радионуклида в организме, класса растворимости и размера частиц в радиоактивном аэрозоле, $\text{Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ (для персонала при поступлении ^{241}Am принят равным $3,9 \cdot 10^{-5} \text{Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$, изотопы ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu – $4,7 \cdot 10^{-5} \text{Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$, ^{241}Pu – $8,5 \cdot 10^{-7} \text{Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$, ^{90}Sr – $1,5 \cdot 10^{-7} \text{Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ и ^{137}Cs – $6,7 \cdot 10^{-9} \text{Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ [5, 9]);

v – интенсивность дыхания, $4,2 \text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ при больших нагрузках [5, 9];

t – продолжительность вдыхания загрязненного воздуха, ч.

Данные обрабатывали с использованием стандартных статистических методов и компьютерного программного обеспечения (MS Excel).

Результаты и их анализ

Оценены ожидаемые эффективные дозы внутреннего облучения персонала за счет ингаляционного поступления трансураниевых элементов при тушении природных пожаров в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС.

По результатам отбора проб радиоактивных аэрозолей и их последующего лабораторного исследования установлено, что при тушении пожара 2015 г. в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике вклад ^{137}Cs в «ингаляционную» дозу облучения персонала составил только 1% [2, 3], при этом вклад ^{90}Sr – 41%, а трансураниевых элементов – 58%. Вклад ^{241}Pu , распадающегося по схеме β -распада и ранее не учитываемого в расчетах, при ингаляционном поступлении составил 3%, т. е. в 3 раза больше, чем ^{137}Cs .

Обеспечена дальнейшая оперативная оценка доз внутреннего облучения персонала расчетным методом. По результатам измерений объемной активности при пожаре 2015 г., а также отбора проб почвы и уточнения плотности загрязнения сгоревшего участка, установлены коэффициенты подъема k_i в выражении (1) для случая верховых лесных пожаров. Коэффициенты подъема для точки, расположенной в 300 м от кромки огня в зоне дыхания участников пожаротушения 14 июня 2015 г., составили: изотопов плутония – $1,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, ^{241}Am – $2,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, ^{90}Sr – $5,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$, ^{137}Cs – $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ [2–4].

Коэффициенты ресуспензии зависят от расстояния до источника радиоактивных аэрозолей, силы и направления ветра, категории устойчивости атмосферы, ландшафта, типа почвы и ряда других параметров, многие из которых сложно оперативно установить

при ликвидации чрезвычайных ситуаций. Поэтому зарубежные эксперты используют и рекомендуют консервативные оценки коэффициентов подъема. В случае, когда участники пожаротушения могут находиться непосредственно у кромки огня, можно применять следующие консервативные значения коэффициентов подъема, полученные по результатам измерений в ходе контролируемых пожаров в украинском секторе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС: для ^{241}Am и изотопов Pu – $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$, для ^{137}Cs и ^{90}Sr – $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$ [7, 8].

Применение расчетного метода демонстрируется на примере пожаров 2017 г. в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС. В табл. 1 представлены значения плотности загрязнения территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в зонах пожаров. С учетом периодов полураспада соотношение между плотностями загрязнения территории заповедника трансураниевыми элементами на 2017 г. оценивается приблизительно как $^{241}\text{Am} : ^{238+239+240}\text{Pu} : ^{241}\text{Pu} = 1,0 : 0,75 : 10$.

По характеру сгоревших лесных горючих материалов, полноте их сгорания и скорости распространения фронта все пожары 2017 г. в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС отнесены к виду низовых лесных пожаров. Поэтому дозы облучения участников пожаротушения, ожидаемые в результате поступления ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{241}Am через органы дыхания, оценивались с использованием консервативных коэффициентов подъема радионуклидов. Объемные активности радионуклидов в зоне дыхания при тушении пожаров 2017 г. в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС, рассчитанные с использованием выражения (1), приведены в табл. 2.

Таблица 1

Лесные пожары, произошедшие на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в 2017 г.

| № | Лесничество | Квадрат | Выдел | Дата | Тушение пожара | | Плотность загрязнения, кБк · м ⁻² | | | | |
|----|---------------|---------|--------|-------|------------------|------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | | | | начало | окончание | ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | ²⁴¹ Pu | ²⁴¹ Am | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
| 1 | Припятское | 86 | 23 | 19.06 | 13 ³² | 18 ²⁵ | 7,4 | 260 | 11 | 110 | 1900 |
| 2 | Дерновичское | 20 | 8 | 19.06 | 18 ¹⁵ | 22 ⁰⁰ | 1,9 | 30 | 2,2 | 15 | 370 |
| 3 | Колыбанское | 46 | 4 | 17.07 | 14 ⁵⁶ | 21 ⁵⁰ | 0,74 | 19 | 0,74 | 30 | 370 |
| 4 | Воротецкое | 31 | 12 | 17.07 | 16 ²⁰ | 20 ³⁰ | 3,7 | 48 | 3,7 | 74 | 1100 |
| 5 | Воротецкое | 45 | 20 | 17.07 | 18 ⁵⁵ | 23 ³⁰ | 3,7 | 48 | 3,7 | 74 | 1100 |
| 6 | Хильчанское | 2–3 | 22, 16 | 26.07 | 14 ³⁴ | 19 ¹⁰ | 1,1 | 15 | 1,1 | 19 | 370 |
| 7 | Колыбанское | 28 | 52 | 26.07 | 18 ²⁰ | 23 ⁵⁰ | 3,7 | 48 | 3,7 | 33 | 370 |
| 8 | Тульговичское | 75 | 3 | 16.08 | 17 ⁴⁵ | 22 ³⁰ | 0,74 | 11 | 0,74 | 11 | 740 |
| 9 | Тульговичское | 75 | 3 | 18.08 | 14 ¹⁵ | 20 ⁰⁰ | 0,74 | 11 | 0,74 | 11 | 740 |
| 10 | Крюковское | 49 | 11 | 20.08 | 17 ¹⁰ | 23 ⁵⁵ | 15 | 260 | 15 | 370 | 11000 |
| 11 | Крюковское | 22 | 26 | 29.09 | 17 ⁰⁵ | 20 ³⁰ | 3,7 | 74 | 3,7 | 190 | 2200 |

Таблица 2

Консервативные оценки объемной активности радионуклидов в зоне дыхания участников пожаротушения в 2017 г. (МБк · м⁻³)

| № | ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | ²⁴¹ Pu | ²⁴¹ Am | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs |
|----|---------------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 1 | 0,74 | 26,0 | 1,0 | 110 | 1900 |
| 2 | 0,19 | 3,0 | 2,0 | 15 | 370 |
| 3 | 0,074 | 1,9 | 0,07 | 30 | 370 |
| 4 | 0,37 | 4,8 | 0,37 | 74 | 1100 |
| 5 | 0,37 | 4,8 | 0,37 | 74 | 1100 |
| 6 | 0,11 | 1,5 | 0,1 | 19 | 370 |
| 7 | 0,37 | 4,8 | 0,37 | 33 | 370 |
| 8 | 0,074 | 1,1 | 0,074 | 11 | 740 |
| 9 | 0,074 | 1,1 | 0,074 | 11 | 740 |
| 10 | 1,5 | 26,0 | 1,5 | 370 | 11000 |
| 11 | 0,37 | 7,4 | 0,37 | 190 | 2200 |

Результаты оценки ожидаемых ингаляционных доз облучения персонала, участвовавшего в тушении пожаров в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС в 2017 г., приведены в табл. 3. Значения доз получены с использованием выражения (2). Оценка ожидаемых доз внутреннего облучения участников пожаротушения выполнена консервативно: принято, что на всех пожарах присутствовали одни и те же работники.

В 2017 г. вклад трансураниевых элементов в индивидуальную эффективную дозу внутреннего облучения персонала, ожидаемую в результате ингаляционного поступления радионуклидов, составил 60%, в том числе от ²⁴¹Am – 27%, ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰Pu – 24% и ²⁴¹Pu – 9%. Тушение всех пожаров заняло 55 ч, индивидуальная эффективная доза внутреннего облучения персонала, ожидаемая в результате ингаляционного поступления радионуклидов, оценивается в 16 мкЗв.

В 2018 г. вклад трансураниевых элементов в ингаляционную дозу облучения составил 62%. 77% индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения персонала, ожи-

даемой в результате ингаляционного поступления радионуклидов, обусловлены тушением пожаров в Крюковском и Колыбанском лесничествах, наиболее загрязненных на территории заповедника.

Обсуждение. При ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС по ряду причин оцениваются только объемная активность ¹³⁷Cs и его распространение на значительные расстояния. В то же время, показано, что вклад ¹³⁷Cs в «ингаляционную» дозу облучения персонала может составлять только 1% от всей внутренней дозы.

Оценены ожидаемые эффективные дозы внутреннего облучения участников тушения пожаров в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС за счет ингаляционного поступления трансураниевых элементов. Установлено, что вклад трансураниевых элементов в ожидаемую эффективную дозу внутреннего облучения составляет около 60%.

Следует отметить, что во всех перечисленных ситуациях дозы облучения персонала, ожидаемые в результате ингаляционного

Таблица 3

Ожидаемые дозы облучения участников пожаротушения, обусловленные ингаляционным поступлением радионуклидов в 2017 г. (при постоянном составе участников и без использования средств индивидуальной защиты органов дыхания), мкЗв

| № | ²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰ Pu | ²⁴¹ Pu | ²⁴¹ Am | ⁹⁰ Sr | ¹³⁷ Cs | ΣE _{инг} |
|----|---------------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0,71 | 0,45 | 0,88 | 0,3 | 0,3 | 2,6 |
| 2 | 0,14 | 0,040 | 0,14 | 0,03 | 0,04 | 0,4 |
| 3 | 0,10 | 0,046 | 0,084 | 0,13 | 0,07 | 0,4 |
| 4 | 0,30 | 0,072 | 0,25 | 0,2 | 0,1 | 1,0 |
| 5 | 0,33 | 0,079 | 0,28 | 0,2 | 0,1 | 1,0 |
| 6 | 0,10 | 0,024 | 0,084 | 0,05 | 0,05 | 0,3 |
| 7 | 0,38 | 0,089 | 0,31 | 0,1 | 0,05 | 0,9 |
| 8 | 0,069 | 0,019 | 0,058 | 0,03 | 0,10 | 0,3 |
| 9 | 0,084 | 0,023 | 0,070 | 0,04 | 0,1 | 0,3 |
| 10 | 2,0 | 0,62 | 1,6 | 2,0 | 2,0 | 8,0 |
| 11 | 0,25 | 0,090 | 0,21 | 0,4 | 0,2 | 1,2 |

поступления радионуклидов, не превышали 0,1 мЗв/год, что значительно меньше контрольного уровня, установленного в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике для персонала (5 мЗв/год).

На территории белорусского сектора зоны отчуждения ЧАЭС оценка объемных активностей всего состава техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu и ^{241}Am) путем отбора проб аэрозолей во время пожара выполнена впервые и единственный раз в 2015 г. Сравнение полученных коэффициентов подъема радионуклидов с более ранними результатами контролируемых экспериментов (пожаров) в украинском секторе зоны отчуждения ЧАЭС [7] показало, что они – одного порядка. Несколько более низкие значения, полученные в Беларуси, можно объяснить тем, что исследовались аэрозоли во время верхового пожара, когда основной запас радионуклидов, расположенный в подстилке леса, был практически не тронут. На Украине же эксперимент проводился с луговыми и низовыми лесными, переходящими в верховые, пожарами.

Предложенные методы позволяют консервативно оценивать ожидаемые ингаляционные дозы облучения персонала в случае тушения пожаров в зоне отчуждения ЧАЭС, а также обеспечить их учет при проведении индивидуального дозиметрического контроля.

В почвах на территории зоны отчуждения ЧАЭС до сих пор находятся высокоактивные частицы облученного ядерного топлива микронного размера. Во время пожаров эти «горячие» частицы могут подниматься с восходящими конвективными потоками воздуха и достигать зоны дыхания персонала, представлять дополнительную опасность при ингаляционном поступлении для участников пожаротушения.

Заключение

Проведенные исследования выявили недостаток данных и необходимость более глубоких исследований подъема топливных частиц во время пожаров с учетом почвенных, климатических, гидрологических и ландшафтных условий. Требуют оценки не только

объемная активность радионуклидов в воздухе, но и растворимость, дисперсный состав частиц аэрозолей (распределение активности частиц по их размерам). Эти факторы оказывают существенное влияние на поступление и метаболизм радионуклидов в организме, радиационные риски для персонала.

Литература

1. Бортновский В.Н., Буздалкина А.М., Буздалкин К.Н. Гигиеническая оценка ингаляционного поступления радионуклидов в результате пожаров в Гомельской области // Пробл. здоровья и экологии. 2016. Т. 1 (47). С. 75–78.
2. Буздалкин К.Н. Облучение персонала в результате ингаляционного поступления радионуклидов при пожарах в зонах отчуждения и отселения Чернобыльской АЭС // Мед.-биол. пробл. жизнедеятельности. 2018. № 1 (19). С. 25–32.
3. Буздалкин К.Н. Оценка воздействия на окружающую среду пожаров в зонах отчуждения и отселения // Радиозоологические и радиобиологические последствия Чернобыльской катастрофы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. И.Н. Семенени. Хойники : ПГРЭЗ, 2017. С. 21–27.
4. Буздалкин К.Н., Нилова Е.К., Кухтевич А.Б. Мониторинг ожидаемых доз облучения спасателей в случаях пожаров на территории радиоактивного загрязнения // Чрезв. ситуации: образование и наука. 2015. № 10 (2). С. 61–64.
5. Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив : утв. постановлением Минздрава Респ. Беларусь, 28.12.2012 г. № 213 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. Минск, 2013. 2/26850.
6. Легасов В.А. [и др.]. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. 1986. Т. 61, вып. 5. С. 301–320.
7. Руководство для участников тушения лесных пожаров в белорусском и украинском секторах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / Организация по безопасности и сотрудничеству в Европе, ОБСЕ. Фрайбург : Гомель : Киев, 2016. 70 с.
8. Kashparov V.A., Lundin S.M., Zvarich S.I. [et al.]. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout // The Science of The Total Environment. 2003. Vol. 317, Iss. 1/3. P. 105–119.
9. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011. 303 p.

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи. Поступила 02.04.2019 г.

Для цитирования. Буздалкин К.Н., Бортновский В.Н. Ингаляционное поступление трансураниевых элементов в организм при чрезвычайных ситуациях в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2019. № 3. С. 59–65. DOI 10.25016/2541-7487-2019-0-3-59-65

Inhalation of transuranic elements in case of emergencies in the exclusion zone of the Chernobyl NPP

Buzdalkin K.N.¹, Bortnovsky V.N.²

¹ Polesye State Radiation-Ecological Reserve (7, Tereshkova Str., Khoyniki, 247618, Belarus)

² Gomel State Medical University (5, Lange Str., Gomel, 246000, Belarus)

✉ Konstantin Nikolaevich Buzdalkin – PhD Techn. Sci. Associate Prof., Head of Dosimetry Problems Laboratory, Polesye State Radiation-Ecological Reserve (7, Tereshkova Str., Khoyniki, 247618, Belarus), e-mail: buzdalkin@tut.by;
Vladimir Nikolaevich Bortnovsky – PhD Med. Sci. Associate Prof., Head of Department of General Hygiene, Ecology and Radiation Medicine, Gomel State Medical University (5, Lange Str., Gomel, 246000, Belarus), e-mail: kafog2@mail.ru.

Abstract

Relevance. In the radioactive contamination territory, any work must be carried out with mandatory individual dosimetric monitoring of participants using all the irradiation pathways. However, at present, the control of personnel exposure through the respiratory organs is not carried out due to the lack of methodological and technical support.

Intention. To estimate the irradiation doses of personnel expected as a result of inhalation of transuranic elements during fires in the Belarusian sector of the Chernobyl exclusion zone.

Methodology. The objects of research are aerosol particles containing ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu and ²⁴¹Am, formed as a result of high-temperature sublimation and combustion of forest materials. The subject of research is the irradiation doses of personnel as a result of inhalation intake of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu and ²⁴¹Pu during fire fighting.

Results and Discussion. The expected doses of internal irradiation in fire extinguishing participants in the Belarusian sector of the Chernobyl exclusion zone due to inhalation of transuranic elements were estimated. The assessments were carried out both by direct measurements of the volume activity of radionuclides in the breathing zone of fire-fighting participants and via calculations. It is shown that the contribution of ¹³⁷Cs to the “inhalation” dose of personnel can be only 1 %. It is established that in the Belarusian sector of the Chernobyl exclusion zone the contribution of transuranic elements to the expected effective dose of internal radiation is about 60 %. Radiation doses of personnel expected as a result of inhalation of radionuclides did not exceed 0.1 mSv per year, which is significantly less than the control level established in the Polesye State Radiation-Ecological Reserve for personnel (5 mSv per year).

Conclusion. The proposed methods make it possible to conservatively assess the expected inhalation doses in personnel in case of fire fighting in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant, as well as to ensure their accounting for individual dosimetric control.

Keywords: emergency, fire, exclusion zone, Chernobyl NPP, inhalation, radionuclide, radiation exposure.

References

1. Bortnovskiy V.N., Buzdalkina A.M., Buzdalkin K.N. Gigienicheskaya otsenka ingyalyatsionnogo postupleniya radionuklidov v rezul'tate pozharov v Gomel'skoi oblasti [Hygienic assessment of inhalation of radionuclides as a result of fires in Gomel region]. *Problemy zdorov'ya i ekologii* [Problems of health and ecology]. 2016. Vol. 1. Pp. 75–78. (In Russ.)
2. Buzdalkin K.N. Oblucheniye personala v rezul'tate ingyalyatsionnogo postupleniya radionuklidov pri pozharakh v zonakh otchuzhdeniya i otseleniya Chernobyl'skoi AES [Irradiation of the personnel as a result of radionuclides inhalation during fires in Chernobyl exclusion zone]. *Mediko-biologicheskije problemy zhiznedeyatel'nosti* [Medical and Biological Problems of Life]. 2018. N 1. Pp. 25–32. (In Russ.)
3. Buzdalkin K.N. Otsenka vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu pozharov v zonakh otchuzhdeniya i otseleniya [Assessment impact of fires in exclusion and resettlement zones on the environment]. *Radioekologicheskije i radiobiologicheskije posledstviya Chernobyl'skoi katastrofy* : [Radioecological and radiobiological consequences of the Chernobyl disaster]. Ed. I.N. Semeneni. Khoyniki. 2017. Pp. 21–27. (In Russ.)
4. Buzdalkin K.N., Nilova E.K., Kukhtevich A.B. Monitoring ozhidaemykh doz oblucheniya spasatelei v sluchayakh pozharov na territorii radioaktivnogo zagryazneniya [Monitoring of expected irradiation doses of rescuers in cases of fires in the contaminated areas]. *Chrezvychainye situatsii: obrazovanie i nauka* [Emergencies: education and science]. 2015. N 10. Pp. 61–64. (In Russ.)
5. Kriterii otsenki radiatsionnogo vozdeistviya: gigienicheskii normativ: utverzhdeno postanovleniem Ministerstva zdavoookhraneniya Respubliki Belarus' 28.12.2012 N 213 [Criteria for evaluation of radiation exposure: Hygienic standard – approved by the Resolution of Ministry of Health N 213, December 28th, 2012]. *Natsional'nyi reestr pravovykh aktov Respubliki Belarus'* [National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus]. Minsk, 2013. 2/26850. (In Russ.)
6. Legasov V.A. [et al.]. Informatsiya ob avarii na Chernobyl'skoi AES i ee posledstviyakh, podgotovlennaya dlya MAGATE [Information on the Chernobyl accident and its consequences prepared for the IAEA]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 1986. Vol. 61, Iss. 5. Pp. 301–320. (In Russ.)
7. Rukovodstvo dlya uchastnikov tusheniya lesnykh pozharov v belorusskom i ukrainskom sektorakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES [Guide for participants in fighting forest fires in the Belarusian and Ukrainian sectors of the exclusion zone of Chernobyl NPP]. Organization for Security and Co-operation in Europe, OSCE. Fraiburg : Gomel' : Kiev. 2016. 70 p. (In Russ.)
8. Kashparov V.A., Lundin S.M., Zvarich S.I. [et al.]. Territory contamination with the radionuclides representing the fuel component of Chernobyl fallout. *The Science of The Total Environment*. 2003. Vol. 317, Iss. 1/3. Pp. 105–119.
9. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna : International Atomic Energy Agency. 2011. 303 p.

Received 02.04.2019

For citing: Buzdalkin K.N., Bortnovskiy V.N. Ingyalyatsionnoe postuplenie transuranovykh elementov v organizm pri chrezvychainykh situatsiyakh v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES. *Mediko-biologicheskije i sotsial'no-psikhologicheskije problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*. 2019. N 3. Pp. 59–65. (In Russ.)

Buzdalkin K.N., Bortnovskiy V.N. Inhalation of transuranic elements in case of emergencies in the exclusion zone of the Chernobyl NPP. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2019. N 3. Pp. 59–65. DOI 10.25016/2541-7487-2019-0-3-59-65