

## Облучение жителей Гомельской области, связанное с ингаляцией "чернобыльских топливных частиц"

Кутьков В.А., Погодин Р.И.\*, Скрыбин А.М.\*

Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва;

\* - Гомельский филиал Института радиационной медицины МЗ Белоруссии, Гомель

Главным источником поступления плутония в организм жителей загрязненных территорий в результате аварии на Чернобыльской АЭС явилась ингаляция аэрозольных частиц диспергированного ядерного топлива - т.н. "чернобыльских топливных частиц". Эти частицы являются редкой формой радиоактивного загрязнения воздуха и их радиобиологические свойства ранее не были достаточно хорошо изучены.

Радиоактивные продукты деления (изотопы I, Te, Cs, Ru, Sr и др.) и трансурановые радионуклиды (Pu, Cm, Am, Np), которые содержат топливные частицы, прочно связаны с матрицей диоксида урана. Благодаря такой связи, их поведение в окружающей среде и в человеческом организме является коллективным. Это явление получило экспериментальное подтверждение при исследовании особенностей распределения изотопов Pu в теле свидетелей аварии и кинетики выведения изотопов Cs из их организма.

Исследование содержания плутония в теле жителей локально загрязненных территорий Гомельской области было предпринято для восстановления величины ингаляционного поступления аэрозольных частиц ядерного топлива в первые дни после аварии на Чернобыльской АЭС, а также для оценки соответствующих доз внутреннего облучения. В результате проделанной работы доказано поступление топливных частиц чернобыльского происхождения в органы дыхания жителей загрязненных территорий. Показано, что по размерам и соотношению изотопов плутония топливные частицы, ингалированные жителями Гомельской области, соответствуют частицам топлива, выброшенным из разрушенного 4-го блока ЧАЭС. Результаты восстановления доз для обследованных групп свидетелей аварии позволяют прогнозировать примерный диапазон доз внутреннего облучения для других групп участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, а также жителей загрязненных территорий Белоруссии, Украины и Российской Федерации.

## Exposure of the population of the Gomel region due to inhalation of the Chernobyl fuel particles

Kut'kov V.A., Pogodin R.I.\*, Skryabin A.M.\*

Russian Scientific Centre "Kurchatov Institute", Moscow;

\* - Gomel Affiliation of Institute of Radiation Medicine of Belorussian Ministry of Health Care, Gomel

The main pathway of plutonium to human body on the territories contaminated after the Chernobyl accident was inhalation of aerosol particles of dispersed nuclear fuel - the so-called "Chernobyl fuel particles". These particles are a rare form of radioactive contamination of the air and their radiobiological properties are poorly understood.

The radioactive fission products (I, Te, Cs, Ru, Sr isotopes and others) and transuranic radionuclides (Pu, Cm, Am, Np) containing fuel particles are firmly fixed with the uranium dioxide matrix. Due to this bonding their behaviour in the environment and in human body is collective. This phenomenon has been experimentally confirmed in the studies of distribution of Pu isotopes in the bodies of the accident liquidators and the kinetics of removal of Cs isotopes from their organisms.

The studies of the plutonium content in body on the contaminated areas of the Gomel region were carried out to reconstruct the value of inhalation intake of aerosol fuel particles in the first days after the Chernobyl NPP and to estimate corresponding internal exposure doses. The completed works have revealed the Chernobyl fuel particles in respiratory organs of the inhabitants on the contaminated areas. It has been shown that in terms of size and ratio of plutonium isotopes, the fuel particles inhaled by the residents of the Gomel region correlate with the fuel particles released from the damaged 4th unit of the Chernobyl NPP. The reconstructed doses for the studied "witnesses" of the accident make it possible to predict the range of internal doses for other groups of liquidators as well as residents of the contaminated areas in Belorus, Ukraine and Russian Federation.

## Введение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в атмосферу были выброшены аэрозольные частицы диспергированного ядерного топлива, а также радиоактивные газы и пары летучих продуктов деления [1]. Радиоактивные пары и газы, взаимодействуя с различными частицами, образовали аэрозоль частиц конденсации. В составе этого аэрозоля находились  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучающие изотопы относительно летучих продуктов деления: Ru, I, Cs, а также, возможно, и Sr. Радиологические характеристики таких аэрозолей хорошо изучены [2]. Изотопы тугоплавких элементов - Zr, Nb, Ce, U и трансурановых нуклидов в составе аэрозолей конденсации не встречались.

Аэрозольные частицы диспергированного ядерного топлива - так называемые "чернобыльские топливные частицы" возникли в результате взрывного разрушения тепловыделяющих элементов 4-го энергоблока. Все радиоактивные продукты деления (изотопы Zr, Sr, Ru, I, Te, Cs, Ce и др.) и трансурановые радионуклиды (изотопы Np, Pu, Am, Cm), которые содержат эти частицы, прочно связаны с матрицей оксидов  $^{238}\text{U}$ . Благодаря такой связи поведение этих радионуклидов в окружающей среде и в человеческом организме является коллективным до тех пор, пока топливная матрица не разрушится в результате химической деструкции или отдельные радионуклиды не покинут ее вследствие выщелачивания. Это явление используется для оценки воздействия топливных частиц на человека [3, 4, 5]. Среди радионуклидов, содержащихся в этих частицах, есть группа изотопов тугоплавких элементов - Zr, Nb, Ce, U и трансурановых нуклидов, которые в условиях аварии на ЧАЭС не встречались в составе аэрозолей конденсации. Они играют роль радионуклидных маркеров частиц диспергированного ядерного топлива, что помогает по их следам в организме человека восстанавливать поступление всех радионуклидов, образовавшихся в реакторе и связанных с топливной матрицей. Вследствие прочной связи с матрицей эти радионуклиды приобрели специфические физико-химические свойства. Они становятся биологически малодоступными для трофических цепей, проявляя в окружающей среде свойства оксидов урана [3].

Основным путем поступления связанных в топливных частицах радионуклидов в организм человека является ингаляция их аэрозоля. Выведение этих радионуклидов из легких осуществляется с помощью двух механизмов. Первый - медленное механическое удаление вместе с частицами без химической деструкции топливной матрицы. В результате частица целиком перемещается или в лимфатические узлы или в органы

желудочно-кишечного тракта, где происходит выщелачивание радионуклидов. Второй механизм - медленная деструкция матрицы или выщелачивание радионуклидов с последующим быстрым перемещением освобожденной активности из легких в другие органы [6]. Следовательно, если топливные маркеры обнаружены в легких, то они несомненно поступили туда в составе топливных частиц. Все остальные топливные радионуклиды также поступили туда в составе тех же частиц в соотношениях, соответствующих соотношениям их активности в топливе 4-го блока Чернобыльской АЭС на момент аварии. Указанные соотношения при использовании в качестве радионуклидного маркера суммарной активности  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  (лучший в настоящее время маркер диспергированного топлива) приведены в таблице 1 [3, 4, 7]. Обследование части персонала Чернобыльской АЭС показало, что участники ликвидации последствий аварии подверглись воздействию аэрозоля диспергированного топлива с активностным медианным аэродинамическим диаметром (АМАД), равным примерно 15 мкм [3, 4, 5, 7, 8]. Выполненное в мае-июне 1986 г. обследование эвакуированных жителей Припяти показало, что некоторыми из них в большом количестве были ингалированы труднорастворимые частицы аэрозоля, содержащие радионуклидные маркеры топлива  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$  и  $^{141}\text{Ce}$  [9]. Это подтверждает возможность ингаляции аэрозоля частиц диспергированного ядерного топлива не только работниками ЧАЭС, но и населением. В отдаленные сроки после аварии использование короткоживущих  $\gamma$ -излучающих топливных маркеров для идентификации поступления топливных частиц в организм стало невозможным.

Изотопы плутония поступали в окружающую среду как вследствие глобальных процессов распределения продуктов испытаний ядерного оружия в атмосфере в 1945-1964 гг., так и вследствие локального загрязнения территорий выбросами предприятий ядерно-топливного цикла. Для глобальных выпадений характерно широтное распределение, при этом их плотность в зоне между 40° и 60° северной широты практически постоянна [10, 11]. Глобальные выпадения характеризуются соотношением  $^{238}\text{Pu}/(^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu})$ , равным 0.04 [11, 12] при средней суммарной поверхностной плотности на широте Чернобыля, равной для  $^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$  60 Бк/м<sup>2</sup>, а для  $^{238}\text{Pu}$  - 1.5 Бк/м<sup>2</sup> [10, 11]. В результате долговременного глобального загрязнения окружающей среды изотопами плутония в организме людей установилась их равновесная концентрация. Ее величина также одинакова для населения, проживающего между 40° и 60° северной широты. По оценкам 1980-1981 гг. в легких жителей ФРГ

содержалось  $2 \pm 1$  (среднее  $\pm$  стандартное отклонение среднего), в легочных лимфатических узлах -  $12 \pm 10$ , в печени -  $24 \pm 4$ , в скелете  $6 \pm 3$  мБк/кг  $^{238}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ . Во всем теле жителей ФРГ в среднем содержалось  $100 \pm 25$  мБк  $^{238}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$  при средней величине отношения  $^{238}\text{Pu} / (^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu})$ , равной  $0.034 \pm 0.005$  [13].

По оценкам 1983-1987 гг. для жителей графства Оксфордшир (Великобритания) средняя величина удельной активности  $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$  в печени составила  $26.4 \pm 4.3$  мБк/кг при средней величине отношения  $^{238}\text{Pu} / (^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu})$ , равной  $0.034 \pm 0.003$  [14].

Таблица 1  
Отношения активности основных радионуклидов в топливе 4-го блока Чернобыльской АЭС к суммарной активности  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  через 24 часа после аварии

Изотоп	Отношение	Изотоп	Отношение	Изотоп	Отношение
$^{89}\text{Sr}$	$1.3\text{e}+3^*$	$^{125}\text{Sb}$	$7.5\text{e}+0$	$^{144\text{m}}\text{Pr}$	$2.2\text{e}+1$
$^{90}\text{Sr}$	$8.6\text{e}+2$	$^{127}\text{Sb}$	$8.1\text{e}+1$	$^{145}\text{Pr}$	$5.3\text{e}+1$
$^{91}\text{Sr}$	$2.2\text{e}+2$	$^{128}\text{Sb}$	$1.9\text{e}+0$	$^{147}\text{Nd}$	$8.1\text{e}+2$
$^{90}\text{Y}$	$9.4\text{e}+1$	$^{129}\text{Sb}$	$4.7\text{e}+0$	$^{147}\text{Pm}$	$4.5\text{e}+1$
$^{91}\text{Y}$	$1.7\text{e}+3$	$^{127}\text{Te}$	$9.2\text{e}+1$	$^{148}\text{Pm}$	$1.2\text{e}+2$
$^{95}\text{Zr}$	$2.2\text{e}+3$	$^{127\text{m}}\text{Te}$	$1.5\text{e}+1$	$^{148\text{m}}\text{Pm}$	$1.1\text{e}+2$
$^{97}\text{Zr}$	$6.4\text{e}+2$	$^{129}\text{Te}$	$5.2\text{e}+1$	$^{149}\text{Pm}$	$7.0\text{e}+2$
$^{95}\text{Nb}$	$2.0\text{e}+3$	$^{129\text{m}}\text{Te}$	$7.0\text{e}+1$	$^{151}\text{Pm}$	$1.2\text{e}+2$
$^{95\text{m}}\text{Nb}$	$1.3\text{e}+1$	$^{131}\text{Te}$	$2.7\text{e}+1$	$^{151}\text{Sm}$	$5.0\text{e}-1$
$^{96}\text{Nb}$	$4.2\text{e}+0$	$^{131\text{m}}\text{Te}$	$1.2\text{e}+2$	$^{153}\text{Sm}$	$6.4\text{e}+2$
$^{97}\text{Nb}$	$7.0\text{e}+2$	$^{132}\text{Te}$	$7.8\text{e}+2$	$^{154}\text{Eu}$	$3.3\text{e}+0$
$^{97\text{m}}\text{Nb}$	$6.4\text{e}+2$	$^{130}\text{I}$	$6.4\text{e}+0$	$^{155}\text{Eu}$	$2.2\text{e}+1$
$^{99}\text{Mo}$	$1.9\text{e}+3$	$^{131}\text{I}$	$9.2\text{e}+2$	$^{156}\text{Eu}$	$8.6\text{e}+2$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$1.9\text{e}+3$	$^{132}\text{I}$	$1.5\text{e}+3$	$^{157}\text{Eu}$	$3.0\text{e}+1$
$^{103}\text{Ru}$	$1.7\text{e}+3$	$^{133}\text{I}$	$1.0\text{e}+3$	$^{160}\text{Tb}$	$1.5\text{e}+0$
$^{105}\text{Ru}$	$1.5\text{e}+1$	$^{135}\text{I}$	$1.3\text{e}+2$	$^{161}\text{Tb}$	$1.9\text{e}+0$
$^{106}\text{Ru}$	$4.7\text{e}+2$	$^{134}\text{Cs}$	$5.9\text{e}+1$	$^{237}\text{U}$	$4.5\text{e}+2$
$^{105}\text{Rh}$	$6.4\text{e}+2$	$^{136}\text{Cs}$	$3.0\text{e}+2$	$^{238}\text{Np}$	$2.3\text{e}+2$
$^{106}\text{Rh}$	$5.0\text{e}+2$	$^{137}\text{Cs}$	$1.1\text{e}+2$	$^{239}\text{Np}$	$7.8\text{e}+3$
$^{109}\text{Pd}$	$8.1\text{e}+1$	$^{140}\text{Ba}$	$1.4\text{e}+3$	$^{238}\text{Pu}$	$3.0\text{e}-1$
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$1.1\text{e}+1$	$^{140}\text{La}$	$2.5\text{e}+3$	$^{239}\text{Pu}$	$3.1\text{e}-1$
$^{111}\text{Ag}$	$5.9\text{e}+1$	$^{141}\text{La}$	$1.9\text{e}+1$	$^{240}\text{Pu}$	$6.9\text{e}-1$
$^{112}\text{Ag}$	$1.0\text{e}+1$	$^{141}\text{Ce}$	$2.2\text{e}+3$	$^{242}\text{Pu}$	$9.2\text{e}-4$
$^{115}\text{Cd}$	$7.0\text{e}+0$	$^{143}\text{Ce}$	$1.1\text{e}+3$	$^{241}\text{Pu}$	$7.8\text{e}+1$
$^{115\text{m}}\text{In}$	$7.5\text{e}+0$	$^{144}\text{Ce}$	$1.6\text{e}+3$	$^{243}\text{Pu}$	$2.2\text{e}+0$
$^{121}\text{Sn}$	$4.4\text{e}+0$	$^{142}\text{Pr}$	$8.1\text{e}+2$	$^{241}\text{Am}$	$5.9\text{e}-2$
$^{122}\text{Sb}$	$3.3\text{e}+0$	$^{143\text{m}}\text{Pr}$	$2.2\text{e}+3$	$^{242}\text{Cm}$	$1.3\text{e}+1$
$^{124}\text{Sb}$	$3.6\text{e}+0$	$^{144}\text{Pr}$	$1.6\text{e}+3$	$^{244}\text{Cm}$	$6.9\text{e}-2$

\* - e+3 обозначает десятичный порядок числа.

Для взрослого населения Гомельской области в качестве глобального уровня удельной активности  $\alpha$ -излучающих изотопов плутония в печени было принято значение  $24$  мБк/кг, в легких -  $2$  мБк/кг (масса печени и легких -  $1.8$  и  $1.0$  кг соответственно [15]). Соотношение  $^{238}\text{Pu} / (^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu})$  при этом было принято равным  $0.04$ .

Исследование содержания изотопов плутония в теле жителей локально загрязненных территорий Гомельской области Белоруссии было предпринято для восстановления величины ингаляционного поступления аэрозольных частиц ядерного топлива в первые дни после аварии на

Чернобыльской АЭС, а также для оценки соответствующих доз внутреннего облучения.

Итак целями данной работы являлись:

1. Доказательство факта поступления топливных частиц "чернобыльского" происхождения в органы дыхания жителей загрязненных территорий;
2. Оценка размера поступавших топливных частиц;
3. Оценка доз внутреннего облучения, обусловленного ингаляцией "чернобыльских топливных частиц".

## 1. Материал и методы

Гомельский филиал Института радиационной медицины Минздрава Белоруссии провел сбор и исследование материалов аутопсии жителей 17 районов Гомельской области, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Собран материал от 125 человек, умерших от различных причин в период с ноября 1990 г. по июнь 1991 г. в возрасте от 20 до 86 лет.

Удельную активность и состав  $\alpha$ -излучающих изотопов плутония определяли в печени, скелете (фрагменты 5-го или 6-го ребра), легких и трахеобронхиальных лимфатических узлах. Масса образца ткани при исследовании легких и печени составляла 500-1000 г, лимфоузлов - 8-15 г, скелета - 200-300 г. Гомогенизированные образцы высушивали при 105°C и затем озоляли влажным способом при 400°C. Для контроля химического выхода на этой стадии в образцы добавляли известное количество  $^{242}\text{Pu}$ . Золу окончательно минерализовали растворением в 7.5 М  $\text{HNO}_3$ . Плутоний выделяли из раствора с помощью анионообменного разделения на смоле ВП-1АР. Активность в выделенном препарате измеряли в слое твердого сцинтиллятора на малофононом  $\alpha$ -радиометре. Для определения изотопного состава плутоний после анионообменного разделения наносили электролитическим способом на полированные диски из нержавеющей стали и измеряли спектры  $\alpha$ -излучения с помощью импульсной ионизационной камеры и многоканального анализатора. Величина минимально детектируемой в пробе активности равнялась для  $^{238}\text{Pu}$  1.6 мБк, а для  $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$  - 1.2 мБк.

Основным источником поступления топливных частиц, а вместе с ними и "чернобыльского" плутония, в организм жителей Гомельской области была кратковременная ингаляция топливного аэрозоля во время прохождения радиоактивного облака. Вторичное пылеобразование в течение весны и лета 1986 г. также могло внести заметный вклад в ингаляционное поступление топливных частиц. Поскольку с момента аварии до даты смерти обследованных прошло около 1700 дней, то такое поступление рассматривали как однократное.

Выпадения диспергированного ядерного топлива на сопредельных территориях Гомельской и Брянской областей характеризуются малой поверхностной плотностью плутония аварийного происхождения [16, 17], а значит и малым уровнем его ингаляционного поступления. Из-за большого размера частиц это должно было привести и, как показали наши исследования, привело (см. ниже табл. 4) к значительным флуктуациям распределения активности между легкими и печенью в обследованной когорте. Следовательно, модели, рекомендованные для условного взрослого человека, будут хорошо описывать биокинетику радионуклидов в организме этих людей только в среднем по когорте.

Среднее содержание изотопов Pu в легких и печени спустя 1700 суток после однократной ингаляции аэрозоля топливных частиц с АМАД  $d_A$  обозначим соответственно как  $\overline{Q}_{lung}(d_A)$  и  $\overline{Q}_{liver}(d_A)$ . Эти зависимости аппроксимируют соотношения:

$$\overline{Q}_{lung} = \overline{I}_0 \cdot 1.3 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-0.15d_A}, \quad (1)$$

$$\overline{Q}_{liver} = \overline{I}_0 \cdot 3.8 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0.042d_A}, \quad (2)$$

где  $\overline{I}_0$  - средняя величина поступления топливных частиц, Бк.

Расчеты параметров в (1, 2) выполнены с помощью компьютерной программы "R-MAN" [27], использующей специальную дозиметрическую модель аэрозоля топливных частиц [3, 4, 7].

Коэффициент распределения плутония, равный отношению содержаний радионуклида в легких и в печени обозначим через  $R_{Pu}$ . Согласно (1, 2) величина этого коэффициента, усредненная по обследованной когорте, при фиксированном времени после поступления, зависит только от эффективной дисперсности ингалированного аэрозоля. Аэрозоли, воздействовавшие на население в ранние сроки после аварии, могли отличаться по величине АМАД. Для первичного аэрозоля величина АМАД близка к 15 мкм [3, 4, 5, 7, 8]. Весной-летом 1986 г. АМАД вторичного аэрозоля, возникшего в результате вторичного пылеобразования, был равен примерно 3 мкм [18]. По изученной когорте можно оценить лишь среднее значение коэффициента распределения плутония  $\overline{R}_{Pu}$  за счет первичного аэрозоля и аэрозоля, возникшего в результате вторичного пылеобразования. Таким образом, эффективная величина АМАД действовавшего на когорту топливного аэрозоля равна:

$$d_A^{eff} = 9.3 \cdot \ln(0.26 \cdot \overline{R}_{Pu}), \text{ мкм}, \quad (3)$$

где  $\overline{R}_{Pu} = \frac{\overline{Q}_{lung}}{\overline{Q}_{liver}}$  - средняя по когорте величина коэффициента распределения плутония.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Удельная активность и изотопный состав плутония в тканях

Удельная активность  $^{238}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$  в печени определена у всех 125 обследованных. В 91 случае обнаруженная величина удельной активности превышала величину глобальной уровня плутония в печени. Сводные данные о результатах исследования содержания плутония в печени и

легких умерших жителей ряда районов Гомельской области Белоруссии приведены в таблице 2.

Удельную активность Pu в легких определили у 31, в костях - у 33, в трахеобронхиальных лимфатических узлах - у 9 человек. Величина суммарной

удельной активности глобального и "чернобыльского" Pu оказалась равной  $27 \pm 2$  мБк/кг в легких (без лимфатических узлов),  $272 \pm 53$  мБк/кг в трахеобронхиальных лимфатических узлах,  $50 \pm 4$  мБк/кг в печени и  $55 \pm 22$  мБк/кг в костях (ребрах).

Таблица 2

**Объем исследований удельной активности плутония в печени и легких жителей Гомельской области**

Район	Число измерений в печени <sup>(a)</sup>	Число измерений в легких
Брагинский	3 (3)	3 (3)
Буда-Кошелевский	6 (5)	1 (1)
Ветковский	15 (13)	7 (7)
Гомельский	46 (34)	11 (11)
Добрушский	16 (12)	1 (1)
Ельский	1 (1)	0
Житковичский	3 (1)	0
Жлобинский	3 (1)	0
Калинковичский	2 (0)	0
Кормянский	2 (0)	1 (1)
Лоевский	2 (2)	0
Наровлянский	1 (1)	0
Речицкий	9 (6)	0
Рогачевский	6 (4)	2 (2)
Светлогорский	3 (3)	1 (1)
Хойникский	3 (2)	0
Чечерский	4 (3)	3 (3)

(a) - в скобках указано число проб с превышением глобального уровня.

Полное содержание Pu в теле обследованной группы составляет  $0.27 \pm 0.15$  Бк [19], что существенно больше глобального европейского уровня, лежащего в пределах от 0.07 до 0.12 Бк [13, 14], однако почти в 10 раз меньше содержания плутония в теле людей, проживающих вблизи комбината "Маяк" (Челябинск-65), равного  $3.8 \pm 1.5$  Бк [19]. Плутоний может поступать в организм человека двумя путями: с пищей и с вдыхаемым воздухом. Величину пищевого поступления "чернобыльского" плутония для жителей Гомельской области не оценивали, однако исследование послеаварийного загрязнения рациона жителей г. Белостока (Польша) показало, что ожидаемое поступление с пищей глобального и "чернобыльского"  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  в этом городе в период с апреля 1986 г. по апрель 1991 г. составило около 2 Бк. Погрешность этой оценки велика и главным образом обусловлена неопределенностью оценки величины годового поступления плутония с пищей в 1986-1989 гг., которая была определена с точностью до порядка [20]. Согласно модели поведения трансурановых элементов в организме взрослого человека [21] в печени откладывается около 0.45% плутония, поступающего в организм вместе с пищей. Таким образом, поступление 1 Бк ава-

рийного плутония может привести к увеличению удельной активности плутония в печени не более чем на 0.25 мБк/кг над глобальным уровнем. Таким образом, значимость пищевого пути поступления "чернобыльского" плутония мала. Следовательно, все наблюдаемое повышенное содержание плутония в организме обследованных обусловлено в основном ингаляцией аэрозоля топливных частиц.

Результаты определения изотопного состава плутония приведены в таблице 3. В исследованных образцах средняя величина отношения  $^{238}\text{Pu}/(^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu})$  значительно отличается от глобального и равна  $0.45 \pm 0.12$ . Полученные данные хорошо согласуются с радионуклидными соотношениями в топливе на момент аварии, приведенными в таблице 1. В пробах воздуха и почвы, отобранных на промплощадке Чернобыльской АЭС 1986 г. величина этого отношения лежала в интервале 0.4-0.7 [22]. В отдельных топливных частицах, обнаруженных в г. Киеве оно оказалось равным  $0.44 \pm 0.02$  [23]. На сопредельных с Гомельской областью территориях Брянской области в верхних слоях почвы после аварии также были обнаружены близкие значения этого изотопного соотношения, лежащие в пределах от 0.12 до 0.58 [16].

Следовательно, в теле жителей Гомельской области обнаружены изотопы плутония чернобыльского происхождения. В условиях этой аварии они являются радионуклидными маркерами

топливных частиц, поэтому полученные данные доказывают, что население загрязненных территорий, удаленных от ЧАЭС, подвергалось ингаляции частиц диспергированного ядерного топлива.

Таблица 3

Изотопный состав плутония в исследованных образцах

Район	Орган	Удельная активность, мБк/кг				Отношение $\frac{^{238}\text{Pu}}{(^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu})}$
		$^{238}\text{Pu}$	Погрешность	$^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$	Погрешность	
Буда-Кошелевский	Печень	6.4	1.9	43.1	2.6	0.15
Буда-Кошелевский	Печень	5.6	2.1	39.3	2.8	0.14
Ветковский	Печень	10.6	2.7	21.5	6.3	0.49
Ветковский	Печень	4.1	1.8	22.7	2.0	0.18
Ветковский	Легкие	4.5	2.4	14.2	2.4	0.32
Гомельский	Печень	4.0	1.1	19.9	1.5	0.20
Гомельский	Печень	4.2	2.0	21.7	2.4	0.20
Гомельский	Печень	3.7	1.3	22.4	1.7	0.17
Гомельский	Печень	6.6	3.2	50.6	3.7	0.13
Гомельский	Легкие	7.5	2.4	4.0	1.8	1.9
Гомельский	Скелет	19.4	6.5	17.9	5.2	1.1
Житковичский	Печень	10.1	4.1	28.0	3.8	0.36
Жлобинский	Печень	3.6	1.2	18.8	1.6	0.19
Наровлянский	Печень	4.0	1.6	54.9	2.7	0.07
Речицкий	Печень	14.2	2.8	80.7	4.2	0.18
Речицкий	Печень	5.0	2.0	38.1	5.0	0.13
Рогачевский	Печень	3.0	1.1	18.0	1.4	0.17
Светлогорский	Печень	31.0	0.5	18.5	5.9	1.7
Хойникский	Печень	3.5	1.8	36.6	2.5	0.10
Чечерский	Скелет	6.6	3.3	8.4	3.2	0.79

2.2. Размер и величина поступления топливных частиц

В таблице 4 приведены отобранные для дальнейшего анализа результаты оценки удельной активности "чернобыльского" плутония у 21 жителя Гомельской области (соответствующие глобальные уровни содержания плутония вычтены из результатов измерений). Таким образом, данные, приведенные в таблице 4, характеризуют удельную активность плутония, поступившего в организм только в составе топливных частиц. Величина  $R_{Pu}$  для обследованной группы оказалась равной  $0.94 \pm 0.16$ . Используя это значение  $R_{Pu}$  в уравнении (3), мы оценили величину  $d^{eff}$  для топливных частиц, поступивших в органы дыхания жителей Гомельской области -  $12 \pm 3$  мкм, что полностью согласуется с оценками АМАД первичного аэрозоля частиц диспергированного топлива [3, 4, 5, 7, 8,].

Основным путем поступления глобального плутония в организм является его поступление вместе с пищей [24]. В отдаленные сроки после окончания испытаний ядерного оружия в атмосфере (в 1972-1980 гг.) темп годового поступления  $^{239}\text{Pu}$ ,

$^{240}\text{Pu}$  с пищей по оценкам, сделанным для ряда городов США [24], Италии [25] и Японии [26] составлял 60 мБк/год. Таким образом, поступление глобального Pu в организм жителей Гомельской области за 1700 суток должно было составить 0.3 Бк  $^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$ .

Величину поступления топливных частиц определяли по средней для когорты величине содержания "чернобыльского" плутония в печени. Как было показано ранее, величина среднего для когорты уровня удельной активности  $\alpha$ -излучающих изотопов плутония чернобыльского и глобального происхождения равно  $50 \pm 4$  мБк/кг. Таким образом, обследованная когорта характеризуется средней величиной удельной активности  $^{238}\text{Pu}+^{239}\text{Pu}+^{240}\text{Pu}$  в печени, превышающей глобальный уровень на  $26 \pm 5$  мБк/кг, что соответствует среднему содержанию в печени  $\alpha$ -излучающих изотопов плутония чернобыльского происхождения, равному  $47 \pm 9$  мБк.

Согласно (1) спустя 1700 дней после ингаляционного поступления в печени остается в среднем 0.2% плутония, поступившего в органы дыхания в составе частиц топлива. Следовательно, его ингаляционное поступление в результате чернобыльской аварии в организм обследованной

группы жителей Гомельской области характеризуется средней величиной, равной  $23 \pm 5$  Бк  $^{238}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ . Это эквивалентно ингаляционному поступлению  $18 \pm 4$  Бк  $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$  или  $29 \pm 6$  кБк  $^{144}\text{Ce}$  как радионуклидных маркеров аэрозоля

диспергированного ядерного топлива. По данным работы [23] суммарное ингаляционное поступление  $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$  в организм жителей Киева оценивается величиной 210 мБк.

Таблица 4

**Удельная активность "чернобыльского" плутония в исследованных образцах легких и печени**

Район	Удельная активность <sup>(а)</sup> плутония, мБк/кг		$R_{\text{Pu}}$
	Легкие	Печень	
Буда-Кошелевский	47	34	0.77
Брагинский	29	110	0.16
Брагинский	33	28	0.66
Брагинский	27	74	0.20
Ветковский	38	80	0.27
Ветковский	30	6	2.8
Ветковский	29	52	0.31
Ветковский	44	73	0.33
Ветковский	15	5	1.6
Ветковский	18	6	1.8
Гомельский	23	7	1.8
Гомельский	23	10	1.3
Гомельский	17	6	1.5
Гомельский	34	16	1.2
Гомельский	17	59	0.16
Гомельский	14	10	0.75
Гомельский	11	19	0.33
Гомельский	13	13	0.55
Добрушский	39	25	0.87
Рогачевский	54	53	0.57

(а) - удельная активность вычислена как разность между измеренной удельной активностью Pu и принятым для данного органа глобальным уровнем.

### 3. Дозы внутреннего облучения

Основным источником внутреннего облучения населения загрязненных территорий явилось потребление продуктов питания, содержащих радионуклиды, находящихся в выпадениях в форме частиц конденсации. Высокая биологическая доступность изотопов I, Cs и Sr, связанных с этой формой выпадений, обусловила высокую скорость переноса этих радионуклидов по трофическим цепям и, следовательно, высокие уровни их поступления в организм человека.

Ингаляционное поступление топливных частиц в органы дыхания жителей Гомельской области явилось небольшой добавкой к дозе внешнего и внутреннего облучения, которые были связаны с изотопами I, Cs и Sr. Для восстановления доз внутреннего облучения, обусловленного ингаляционным поступлением в организм аэрозоля топливных частиц чернобыльской аварии, были разработаны специальные методы, опирающиеся на результаты измерений содержания топливных радионуклидных маркеров в органах и тканях этих людей [3, 4]. Расчеты доз выполнены с помощью компьютерной программы "R-MAN" [27]. При этом

использованы математические фантомы людей различного возраста [28] и учитывающая возраст человека модель осаждения аэрозольных частиц в органах дыхания [29], разработанная для коррекции легочной модели [2]. Для описания индивидуального поведения радионуклидов в организме человека использованы метаболические модели, рекомендованные МКРЗ [2, 21, 30]. Величину ожидаемой эффективной дозы определяли согласно рекомендациям 60 Публикации МКРЗ [31].

Из-за ограниченности имеющегося в нашем распоряжении материала полученные оценки доз могут быть отнесены только к населению Ветковского, Гомельского, Добрушского и Речицкого районов Гомельской области. По мере уточнения связи удельной активности "чернобыльского" плутония в печени с поверхностной плотностью загрязнения топливными частицами эти оценки будут уточнены и распространены на другие территории Белоруссии, Украины и Российской Федерации.

Ранее были сделаны оценки доз внутреннего облучения нескольких групп участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС - "свидетелей" чернобыльской аварии [3, 7, 8]. К их числу были отнесены профессиональные

работники из персонала ЧАЭС и пожарные, работавшие на промплощадке станции 26-27 апреля 1986 г. Обследованные нами жители Гомельской области явились еще одной группой "свидетелей" аварии. Среднегрупповые оценки величины ожи-

даемой эффективной дозы *E* и величины ожидаемой эквивалентной дозы облучения некоторых органов для выделенных групп свидетелей чернобыльской аварии приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Дозы внутреннего облучения профессионалов и населения, связанные с ингаляцией "чернобыльских топливных частиц"**

Состав группы	Эффективная доза, мЗв	Эквивалентная доза, мЗв		
		Легкие	НТК	Печень
<b>Профессионалы<sup>(а)</sup> :</b>	130	400	400	100
Выжившие "свидетели" аварии, лечившиеся в клинике ГНЦ РФ "ИБФ" в 1986 г., и затем на ЧАЭС не работавшие [8]	40	120	120	30
Выжившие "свидетели" аварии, продолжавшие работать на ЧАЭС в 1986-1987 гг. [3, 7]				
<b>Население<sup>(б)</sup> :</b>	3	8	7	3
Взрослые жители Ветковского, Гомельского, Добрушского и Речицкого районов Гомельской области Белоруссии				
Дети возрастом 7-12 лет, проживающие в этих же районах Гомельской области	4	13	11	4
Дети возрастом 2-7 лет, проживающие в этих же районах Гомельской области	4	12	11	4

(а) - учтена ингаляция аэрозоля конденсации, а также аэрозоля частиц диспергированного ядерного топлива;  
 (б) - учтена ингаляция только аэрозоля частиц диспергированного ядерного топлива.

**Заключение**

До чернобыльской аварии аэрозоль топливных частиц никогда не рассматривался как потенциальный источник внутреннего облучения и его свойства не были достаточно изучены.

В результате проделанной работы доказано поступление топливных частиц чернобыльского происхождения в органы дыхания жителей загрязненных территорий. Показано, что по размерам и соотношению изотопов плутония топливные частицы, ингалированные жителями Гомельской области, соответствуют частицам топлива, выброшенным из разрушенного блока Чернобыльской АЭС. Результаты восстановления доз для обследованных групп свидетелей аварии позволяют прогнозировать диапазон доз внутреннего облучения для других групп участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, а также жителей загрязненных территорий Белоруссии, Украины и Российской Федерации.

**Литература**

1. Summary report on the post-accident review meeting on the Chernobyl accident. - Vienna: IAEA, 1986. - STI/PUB/740 (Safety Ser. 75-INSAG-1).
2. ICRP Publication 30. Limits for intakes of radionuclides by workers//Ann. ICRP. - 1979. - V. 2, № 3/4.
3. Кутьков В.А., Муравьев Ю.Б., Арефьева З.С. и др.//Пульмонология. - 1993. - № 4. - С. 10-19.

4. Кутьков В.А., Муравьев Ю.Б.//Медицинская радиология и радиационная безопасность. -1994. - № 4. - С. 4-9.
5. Kut'kov V.A. Chernobyl fuel hot particles in man//Proc. Int. Symp. Radioecology: Chemical speciation - Hot particles. - Znojmo. CEC: IUR, SCzR, 1992.
6. ICRP Publication 66. Human respiratory tract model for radiological protection//Ann. ICRP. -1994. - V. 24, № 1-3.
7. Kut'kov V.A., Murav'ev Yu.B., Aref'eva Z.S., et al. Internal doses of Chernobyl accident witnesses including doses from nuclear fuel particles //Umweltradioaktivitat, Radioökologie, Strahlenwirkungen/Eds. Winter M., Wicke A. - Koln.: Verlag TUV Rheinland, 1993. - P. 816-820.
8. Кутьков В.А., Дементьев С.И., Гусев И.А. //Медицинская радиология и радиационная безопасность. - 1996. (в печати)
9. Пилипенко Н.И., Калмыков Л.З., Барабанова В.В. и др.//Медицинская радиология. - 1992. - № 5-6. - С. 28-31.
10. Sources and effects of ionizing radiation. - UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Annex B: Exposures from man-made sources of radiation. - New York: UN, 1993.
11. Krey P.W., Hardy E.P., Pachucki C. et al. Mass isotopic composition of global fall-out plutonium in soil//Transuranium nuclides in the environment. - Vienna: IAEA, 1976. - STI/PUB/410. - P. 671-678.

12. **Hardy E.P., Krey P.W., Volchok H.L.**//Nature. - 1973. - V. 241, № 5390. - P. 444-445.
13. **Bunzl K., Henrichs K., Kracke W.** Distribution of fall-out  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{240}\text{Pu}$  in persons of different ages from the Federal Republic of Germany//Assessment of radioactive contamination in man. - Vienna: IAEA, 1985. - STI/PUB/674. - P. 541-555.
14. **Popplewell D.S., Ham G.J., McCarthy W. et al.**//Radiat. Prot. Dosim. - 1989. - V.26, № 1/4. - P. 313-316.
15. Человек. Медико-биологические данные. Публикация 23 МКРЗ. - М.: Медицина, 1977.
16. **Швыдко Н.С., Иванова Н.П., Салазкина Н.В. и др.**//Медицинская радиология и радиационная безопасность. - 1994. - № 4. - С. 10-12.
17. Данные по радиоактивному загрязнению территории Российской Федерации  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ //Радиация и риск. - 1993. - Вып. 3, Прил. 1. - С. 7-66.
18. **Будыка А.К., Огородников Б.И., Скитович В.И.** Применение средств индивидуальной защиты органов дыхания с учетом дисперсности радиоактивных аэрозолей в 30-километровой зоне ЧАЭС//Охрана окружающей среды, вопросы экологии и контроль качества продукции. - М.: НИИТЭХИМ, 1992. - Вып. 5. - С. 19-32.
19. **Hohryakov V.F., Syslova C.S., Skryabin A.M.** //Sci. Total Environ. - 1994. - V. 142. - P. 101-104.
20. **Pietrzak-Flis Z., Orzechowska G.**//Health Phys. - 1993. - V. 65, № 5. - P. 489-492.
21. ICRP Publication 48. The Metabolism of Plutonium and Related Elements//Ann. ICRP. - 1986. - V. 17, № 1-3.
22. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ (Вена 25-29 августа 1986). - Ч. 2, Приложение 4: Оценка количества, состава и динамики выброса радиоактивных веществ из поврежденного реактора. - М.: ГКИАЭ, 1986.
23. **Kawamura H.**//Health Phys. - 1987. - V. 52, № 6. - P. 793-795.
24. **Bennett B.G.** Transuranic element pathways to man//Transuranium nuclides in the environment. - Vienna: IAEA, 1976. - STI/PUB/410. - P. 367-383.
25. **Clemente G.F., Belloni P., Di Pietro S. et al** Tritium and plutonium content of the Italian diet and transfer to man//Biological implications of radionuclides released from nuclear industries. Vienna: IAEA, 1979. - STI/PUB/522. - V.2. - P. 257-264.
26. **Hisamatsu S., Takizawa Y., Abe T.**//Health Phys. - 1987. - V. 52, № 2. - P. 193-200.
27. **Murav'ev Yu. B., Kut'kov V.A.** "R-MAN" a computer code for internal dose evaluation and the handbook "Dose conversion factors for inhalation and ingestion for persons of different ages"//Nuclear energy and human safety: Proc. of 4th Annual scientific & technical conference of the Nuclear Society. - Nizhni Novgorod: Nuclear Society, 1993. - P. 247-250.
28. **Christy M., Eckerman K.E.** Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources. - Oak-Ridge, 1987. - ORNL/TM -8381. - V. 17.
29. **Grawford D.J., Eckerman K.F.**//Radiat. Prot. Dosim. - 1982. - V. 2, № 4. - P. 209-220.
30. ICRP Publication 56. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1//Ann. ICRP. - 1989. - V. 20, № 2.
31. ICRP Publication 60. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection//Ann. ICRP. - 1990. - V. 21, № 1-3.