

В. А. Кашпаров¹, М. А. Журба¹, С. И. Киреев², С. В. Зибцев¹, В. В. Миронюк¹¹ *Національний університет біоресурсів і природопольовання України, Київ*² *Государственное специализированное предприятие «Чернобыльский спецкомбинат», Чернобыль***ОЦЕНКА ОЖИДАЕМЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ УЧАСТНИКОВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ В ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ В АПРЕЛЕ 2015 г.**

На основании данных о площади и типах пожара в чернобыльской зоне отчуждения 27 - 29 апреля 2015 г., уровнях радионуклидного загрязнения территории и горючего материала оценены ожидаемые эффективные дозы для участников пожаротушения, которые за 1 ч работы не превышали 0,64 от внешнего и 0,37 мкЗв от внутреннего облучения. Показано, что ожидаемая эффективная доза от внутреннего облучения чернобыльских радионуклидов была ниже доз от внешнего облучения. Во время лесных и луговых пожаров в чернобыльской зоне в настоящее время ⁹⁰Sr и ²⁴¹Pu, наряду с ²³⁸⁻²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am, могут вносить значимый вклад в формирование суммарной дозы внутреннего облучения.

Ключевые слова: ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, плутоний, америций, радиозкология, радионуклидное загрязнение, Чернобыльская авария, зона отчуждения, лесная радиозкология, лесные пожары, луговые пожары, дозы облучения.

Вступлення

После Чернобыльской аварии в 1986 г. наибольшему долговременному радионуклидному загрязнению ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁸⁻²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am (табл. 1) подверглась чернобыльская зона отчуждения и зона безусловного (обязательного) отселения (далее – зона отчуждения (ЗО)). Основная масса ⁹⁰Sr, ²³⁸⁻²⁴¹Pu и ²⁴¹Am во время аварийного выброса находилась в матрице частиц облученного ядерного топлива, так называемой топливной

компоненте чернобыльских радиоактивных выпадений. К настоящему времени более 80 % топливных горячих частиц растворились в почве и радионуклиды включились в процессы биогеохимической миграции. Это привело к тому, что на данный момент в лесной подстилке, древостое и подлеске может находиться до половины активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs от содержания в почве, а также менее 1 % ²³⁸⁻²⁴¹Pu и ²⁴¹Am, которые содержатся в нижней гумифицированной части подстилки [1 - 3].

Таблица 1. Основные характеристики радионуклидов и их дозовые коэффициенты для персонала [8, 9]

<i>i</i> -й	Радионуклид	Основной вид излучения	Период полураспада (T _{1/2}), лет	Отношение $A_s^i / A_s^{Pu-239+240}$ в ЗО на 2015 г.	Класс растворимости аэрозоля и АМАД, мкм	B_{inh}^i , мкЗв/Бк	B_{sy}^i , (мкЗв/ч)/(кБк/м ²)
1	⁹⁰ Sr → (⁹⁰ Y)	β	29 (64,3 ч)	40 - 100	S, 1 F, 1	0,15 0,025	6,2 · 10 ⁻⁶
2	¹³⁷ Cs → (^{137m} Ba)	β, γ	30,2 (2,5 мин)	50 - 1000	F, 5 F, 1	0,007 0,005	7,9 · 10 ⁻⁴
3	²³⁸ Pu	α	87,7	0,5	M, 1	43	5,8 · 10 ⁻⁸
4	²³⁹ Pu	α	24100	1	M, 1	47	1,2 · 10 ⁻⁷
	²⁴⁰ Pu	α	6563				5,7 · 10 ⁻⁸
5	²⁴¹ Pu →	β	14,4	19	M, 1	0,85	1,8 · 10 ⁻⁹
6	²⁴¹ Am	α	432,8	1,8	M, 1	39	1,7 · 10 ⁻⁵

При сгорании подстилки, травянистой и древесной растительности во время пожара происходит утечка радионуклидов в парогазовой фазе (¹³⁷Cs и в меньшей степени ⁹⁰Sr), а также вместе с пеплом и золой, что приводит к увеличению удельной объемной активности радионуклидов в приземном слое воздуха в десятки и тысячи раз [1, 4 - 7]. Наличие радиоактивных аэрозолей

субмикронного и микронного размеров, содержащих ⁹⁰Sr и альфа-излучающие радионуклиды, создает опасность внутреннего облучения участников пожаротушения в ЗО за счет ингаляции, соизмеримой с эффективными дозами внешнего облучения [2].

26 - 29 апреля 2015 г. в ЗО на площади 10127 га произошел крупнейший пожар в Укра-

© В. А. Кашпаров, М. А. Журба, С. И. Киреев, С. В. Зибцев, В. В. Миронюк, 2015

ине на радиоактивно загрязненной территории после 1992 г. [10]. 27 апреля пожар приобрел угрожающие масштабы – стал распространяться в сторону ЧАЭС и приблизился к местам захоронения радиоактивных отходов, характеризующихся аномально высокими уровнями радионуклидного загрязнения растительного горючего материала [1, 11, 12]. Площадь и тип пожара в динамике были оценены по степени повреждения растительного покрова и почвы по данным дистанционного зонирования земли (ДЗЗ) [10]. Для этого была использована разница индексов Normalized Burn Ratio (NBR) до и после пожара. Было установлено, что травяным пожаром пройдено 6250 га лугов, лесным низовым и верховым пожарами – 2737 и 1140 га соответственно. Максимальная плотность загрязнения территории на участках низового лесного пожара в кварталах 306 - 308 Лубянского лесничества достигала по ^{137}Cs – 1040, ^{90}Sr – 368, $^{238+240}\text{Pu}$ – 11,4 и ^{241}Am – 14,4 кБк/м² [10].

Для тушения пожара в ЗО наряду с работниками комплекса лесного хозяйства (КЛХ) «Чернобыльская пуца» ГСП «Чернобыльский спецкомбинат» и Государственной службы по чрезвычайным ситуациям Украины оперативно был привлечен аварийный персонал из других регионов без надлежащего радиологического обеспечения.

В аварийной ситуации, связанной с реальным или потенциальным облучением людей, основные международные нормы безопасности МАГАТЭ и НРБУ-97 требуют обеспечения оценки дозы облучения персонала и населения, а также проведения индивидуального дозиметрического контроля и мониторинга окружающей среды [8, 13]. Привлеченный персонал должен быть заранее обучен и проинформирован о радиационной обстановке в местах проведения работ, полученных и возможных (ожидаемых) дозах облучения, а также о соответствующим этим дозам риске для здоровья. Типичный аварийный план должен содержать утвержденные МОЗ Украины систему оперативного и долговременного прогнозов дозиметрической обстановки по мере развития аварии – это не было сделано.

Еще до начала тушения пожара в ЗО должна была быть проведена оценка ожидаемых доз облучения участников пожаротушения. Кроме этого, для всего аварийного персонала категории А, задействованного в пожаротушении 27 - 29 апреля 2015 г., должны быть определены полученные им индивидуальные эффективные дозы облучения. Если величины эффективных доз внешнего облучения можно получить на основании данных непосредственного дозиметрического контроля или по плотности загрязнения территории ^{137}Cs и

времени работы, то дозы внутреннего облучения за счет ингаляции ^{90}Sr , $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am можно оценить на основании результатов измерений удельной объемной активности этих радионуклидов в зоне дыхания персонала, что в условиях пожаротушения осуществить крайне затруднительно, или только расчетным способом. Такие расчетные оценки не были проведены, что не позволяет однозначно оценить риск для здоровья персонала, участвовавшего в пожаротушении в ЗО в конце апреля 2015 г.

Наряду с радиологической опасностью сама информация о пожарах в чернобыльской зоне имеет значительное социально-психологическое влияние как для населения Украины, так и за ее пределами. В связи с этим особую актуальность приобретает достоверная оценка радиологической значимости и опасности последствий пожаров в ЗО для участников пожаротушения, персонала и населения.

Задачей настоящей работы является оценка средней удельной объемной активности радионуклидов в приземном слое воздуха во время пожара и величин ожидаемых эффективных доз облучения участников пожаротушения в ЗО в зависимости от типа пожара в период 27 - 29 апреля 2015 г.

Объекты и методы исследований

На основании результатов обработки данных ДЗЗ о развитии пожара и информации по выделенной таксационной базе данных (БД) «Чернобыльская пуца» (БД «СН_PUSHA») производственного объединения «Укррослеспроект» были получены в динамике (27, 28 и 29 апреля 2015 г.) контуры, а также тип пожара (луговой, лесной низовой и верховой) в ЗО [10]. Эта информация наряду с данными о плотности радионуклидного загрязнения территорий, пройденных огнем, использовалась для оценки содержания радионуклидов в горючем материале (травянистой растительности лугов, лесной подстилке и фитомассе лесов).

Плотность загрязнения территории i -м радионуклидом ($A_s^i(x, y, t)$, где $i = 1$ для ^{90}Sr , $i = 2$ для ^{137}Cs , $i = 3$ для ^{238}Pu , $i = 4$ для $^{239+240}\text{Pu}$, $i = 5$ для ^{241}Pu , $i = 6$ для ^{241}Am , см. табл. 1) на конкретный момент времени t в точке с координатами x, y является базовой исходной информацией для оценки уровней радиоактивного загрязнения горючего материала и удельной объемной активности радионуклидов в воздухе при пожаре, а также расчета мощности эквивалентной дозы внешнего облучения и ожидаемых эффективных доз внутреннего облучения за счет ингаляцион-

ного поступления радионуклидов при лесных и луговых пожарах.

Плотность загрязнения территории i -м радионуклидом в каждом выделе кварталов КЛХ «Чернобыльская пуца» определялась на основании данных (экстраполяции поверхностей загрязнения), полученных в ходе работ по картированию территории ЗО в 1997 - 2000 гг. Для этого дополнительно были созданы поля, в которые помещались данные о средней плотности загрязнения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am территории (A_s^i , кБк/м²) каждого выдела по состоянию на 2015 г. [10]. Плотность загрязнения территории ^{241}Pu в дальнейшем рассчитывалась по соотношению с активностью $^{239+240}\text{Pu}$ (см. табл. 1).

Удельная активность i -го радионуклида в структурных компонентах древостоя была оценена на основании БД «СН_PUSHA» о средней плотности загрязнения почвы выдела i -м радионуклидом (A_s^i , кБк/м²) и максимальных значениях коэффициентов перехода радионуклидов ($Tf_{j,k}^i$ ((Бк/кг)/(кБк/м²))) из почвы в сухие k -е компоненты древостоя ($k = 1$ для древесины, $k = 2$ для коры, $k = 3$ для ветвей менее 1 см, $k = 4$ для хвои/листьев) для разного вида j -х деревьев: $j = 1$ для сосны и $j = 2$ для березы, а также других листовых пород [2, 3, 14]: $A_{m_bio,j,k}^i = A_s^i \cdot Tf_{j,k}^i$. На основании данных о продуктивности j -го вида древесины из БД «СН_PUSHA» ($M_{j,1}$, кг/м²), а также усредненных соотношений между массой k -й компоненты горючего материала по отношению к древесине ($k = 1$) для разного вида j -х деревьев в зависимости от их возраста, высоты и среднего диаметра (бонитета) – ($M_{j,k} / M_{j,1}$) [15] для каждого выдела была оценена средняя удельная поверхностная активность (запас на единице поверхности) i -го радионуклида в k -й компоненте горючего материала j -го вида древостоя:

$$A_{s_bio,j,k}^i = A_{m_bio,j,k}^i \cdot M_{j,k}, \text{ Бк/м}^2. \quad (1)$$

При луговых и лесных пожарах значимым источником утечки альфа-излучающих радионуклидов может быть трава с неминерализовавшимся слоем войлока на лугах ($j = 0, k = 0$) и лесная подстилка ($j = 1,2$ и $k = 0$). Урожайность сухих трав на лугах ЗО обычно составляет около 0,2 – 0,3 кг/м², при этом содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в траве и войлоке по отношению к почве не превышает 1 % ($A_{s_bio,0,0}^{i=1,2} = A_s^i \cdot 1000 \cdot 0.01 = A_s^i \cdot 10$ Бк/м²), а содержание $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am будет еще более чем в 10 раз ниже из-за малых коэффициентов пере-

хода в растения ($A_{s_bio,0,0}^{i=3-6} = A_s^i \cdot 1$ Бк/м²). В мощной подстилке соснового леса может находиться до 20 % активности ^{90}Sr и ^{137}Cs ($A_{s_bio,j=1-2,0}^{i=1,2} = A_s^i \cdot 200$ Бк/м²), а также до 0,5 % активности $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am ($A_{s_bio,j=1-2,0}^{i=3-6} = A_s^i \cdot 5$ Бк/м²) от общего содержания в экосистеме [2, 14]. В листовых лесах содержание радионуклидов в подстилке значительно ниже по сравнению с хвойными, тем не менее при консервативных расчетах использовались приведенные выше максимальные значения относительного запаса радионуклидов в подстилке всех видов лесов ЗО.

Доля сгораемого горючего материала зависит от вида пожара и класса природной пожарной опасности для разных погодных условий и изменяется от 0 для древесины до 97 % для хвои/листьев при верховых пожарах. На основании данных о запасах i -го радионуклида в горючем материале и его утечке с единицы поверхности в зависимости от вида пожара и класса природной пожарной опасности может быть оценена интегральная/средняя приземная удельная объемная активность i -го радионуклида в воздухе на различных удалениях от источника и при разных метеорологических условиях. Для этого обычно используются различные модели конвективного подъема и рассеяния (дисперсии) радиоактивного аэрозоля в атмосфере [4, 5, 16]. Тем не менее данные модели не позволяют рассчитать концентрацию радионуклидов в зоне дыхания участников пожаротушения в непосредственной близости от фронта огня из-за мощных конвективных потоков и турбулентности воздуха [4]. Поэтому для этой цели обычно используются экспериментально полученные эмпирические соотношения между средней удельной объемной активностью радионуклидов в воздухе в зоне дыхания участников пожаротушения около фронта огня и поверхностной плотностью загрязнения радионуклидом горючего материала.

При проведении активных экспериментов в наиболее загрязненной 10-километровой ЗО во время луговых пожаров (горение сухой травы) и сильных низовых лесных пожаров, переходящих в верховые, было установлено, что около фронта огня отношение средней приземной объемной удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs , ($A_v^{i=1,2}$, Бк/м³) к запасу в горючем материале на единице поверхности ($A_{s_bio}^{i=1,2}$, Бк/м²) не превышало $R_{bio} < 2 \cdot 10^{-5}$ 1/м (для $^{238-240}\text{Pu}$ $R_{bio} < 3 \cdot 10^{-6}$ 1/м) или по отношению к плотности загрязнения территории i -м радионуклидом (A_s^i , кБк/м²) было меньше

$R_s < 4 \cdot 10^{-7}$ 1/м (для $^{238-240}\text{Pu}$ $R_{bio} < 4 \cdot 10^{-8}$ 1/м) [2, 4].

Таким образом, средняя приземная объемная удельная активность i -го радионуклида в зоне дыхания участников пожаротушения в непосредственной близости от фронта огня была консервативно оценена при $R_{bio} = 10^{-5}$ 1/м как

$$A_{V_низовой}^i = 10^{-5} \cdot A_{s_bio,j,0}^i, \text{ Бк/м}^3 \quad (2)$$

при луговых ($j = 0$) и низовых лесных ($j = 1,2$) пожарах: сгорает только подстилка и травостой ($A_{s_bio,j,k}^i = 0$ при $k > 0$);

$$A_{V_верховой}^i = 10^{-5} \cdot \sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^4 A_{s_bio,j,k}^i, \text{ Бк/м}^3 \quad (3)$$

при верховых лесных ($j = 1,2$) пожарах сгорает подстилка ($k = 0$) и все компоненты фитомассы древостоя ($k = 2 - 4$), кроме древесины ($A_{s_bio,j,0}^i = 0$ при $k = 1$).

Доза внешнего облучения участников пожаротушения формируется в основном (более 99 %) за счет гамма-излучения $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137m}\text{Ba}$, содержащихся в подстилке, древостое и верхнем минеральном слое почвы (см. табл. 1).

Мощность эффективной дозы внешнего облучения P_{ext} (мкЗв/ч) от радионуклидов, расположенных в 5-сантиметровом минеральном слое почвы, для взрослого человека была рассчитана как

$$P_{ext} = 0,77 \cdot \sum_{i=1}^6 A_s^i \cdot B_{sy}^i, \quad (4)$$

где 0,77 – коэффициент перехода от эквивалентной дозы к эффективной дозе для взрослого человека; B_{sy}^i – дозовый коэффициент, равный отношению мощности эффективной дозы (МЭД, мкЗв/ч) к плотности загрязнения территории i -м радионуклидом (A_s^i , кБк/м²), содержащимся в 5-сантиметровом слое почвы (см. табл. 1 [9]), который для $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137m}\text{Ba}$ ($B_{sy}^i = 7,9 \times 10^{-4}$ (мкЗв/ч)/(кБк/м²)) хорошо согласуется с экспериментальными данными для ЗО на 2015 г. ($(9 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ (мкЗв/ч)/(кБк/м²)).

Доза внешнего облучения от радионуклидов в облаке (дымовом шлейфе) при пожаре не учитывалась, так как пренебрежимо мала по сравнению с внешней дозой от чернобыльских радионуклидов (в $10^4 - 10^5$ раза ниже), находящихся в лесной экосистеме [2].

Ожидаемая эффективная доза внешнего облучения D_{ext} (мкЗв) для взрослого человека за вре-

мя облучения в течение t часов будет равна

$$D_{ext}(t) = P_{ext} \cdot t. \quad (5)$$

Доза внутреннего облучения участников пожаротушения может формироваться за счет ингаляционного поступления радионуклидов через органы дыхания. При луговых и лесных пожарах образуются радиоактивные аэрозоли с размером от десятых долей микрона до нереспираторных фракций более 10 мкм [2, 4], при этом ^{90}Sr и ^{137}Cs находятся как в горючем растительном материале, так и в продуктах горения в быстрорастворимых формах (класс F). Тем не менее для консервативных оценок ингаляционных доз были использованы максимальные значения дозовых коэффициентов для персонала (B_{inh}^i , мкЗв/Бк) для разных значений АМАД и класса растворимости радиоактивных аэрозолей (см. табл. 1). B_{inh}^{Sr-90} при АМАД = 1 мкм для класса растворимости F и S отличаются в 6 раз для взрослого человека.

Ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов D_{int} (мкЗв) для взрослого человека (без использования средств индивидуальной защиты – респираторов и т.п.) при интенсивной работе в течение t часов была рассчитана как

$$D_{int}(t) = \sum_{i=1}^6 A_v^i \cdot B_{inh}^i \cdot t \cdot V, \quad (6)$$

где $V = 3 \text{ м}^3/\text{ч}$ – объем дыхания взрослого человека при тяжелой физической нагрузке во время пожаротушения [13]; B_{inh}^i – максимальные значения дозовых коэффициентов для персонала, равные ожидаемой эффективной дозе за счет ингаляционного поступления 1 Бк i -го радионуклида в организм взрослого человека при классе растворимости S и АМАД = 1 мкм для ^{90}Sr , F и АМАД = 5 мкм для ^{137}Cs , M и АМАД = 1 мкм для аэрозолей $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am , мкЗв/Бк (см. табл. 1) [8].

Суммарная ожидаемая эффективная доза облучения взрослого человека D_{tot} (мкЗв) при тушении лесного пожара в течение t часов будет равна сумме эффективных доз, обусловленных внешним и внутренним облучением

$$D_{tot}(t) = D_{ext}(t) + D_{int}(t). \quad (7)$$

Результаты

Используя контуры луговых, лесных низовых и верховых пожаров на протяжении 26 - 29 апреля 2015 г. в ЗО, данные по плотности радио-

нуклидного загрязнения выделов [10], а также вида, продуктивности и других характеристик растительности, были рассчитаны удельная поверхностная активность каждого i -го радионуклида в горячем материале ($A_{s_bio,j,k}^i$, (1)) и удельная объемная активность радионуклидов в воздухе для разных типов пожаров (A_v^i , (2) и (3)). Консервативная оценка удельной объемной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs ($A_v^{i=1,2}$) в воздухе около фронта огня при лесных пожарах на наиболее загрязненном северном участке могла достигать единиц Бк/м³ ($A_v^{Pu-238-240} < 10^{-3}$ Бк/м³, $A_v^{Pu-241} < 10^{-2}$ Бк/м³ и $A_v^{Am-241} < 10^{-3}$ Бк/м³), что на 2 по-

рядка величины превышает максимальные значения инструментальных измерений $A_v^{i=1,2}$ ГСП «Чернобыльский спецкомбинат» во время пожара (табл. 2, рисунок). При максимальном содержании в воздухе ^{137}Cs ($A_v^{i=2}$) на уровне единиц Бк/м³ создаваемая им мощность эквивалентной дозы будет порядка $n \cdot 10^{-4}$ мкЗв/ч [9]. Это в сотни раз меньше природного радиоактивного фона и тем более уровней МЭД в ЗО, поэтому не было зафиксировано каких-либо изменений мощности эквивалентной дозы автоматическими средствами контроля радиационной обстановки во время пожара по сравнению с измерениями до и после пожара 26 -29 апреля 2015 г.

Таблица 2. Объемная активность радионуклидов в пробах воздуха, отобранных ГСП «Чернобыльский спецкомбинат» мобильными аспираторами в зоне задымления

Место отбора пробы	Дата отбора проб	Объемная активность радионуклидов, Бк/м ³		Контрольные уровни	
		⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
с. Стечанка	27.04.2015	$(3,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$	$(7,7 \pm 1,5) \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
с. Ст. Красница	28.04.2015	$(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$	$(7,6 \pm 1,5) \cdot 10^{-3}$		
с. Лубянка	29.04.2015	$(7,1 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$	$(1,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$		

Максимальная объемная удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs ($A_v^{Sr-90} = 1 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³, $A_v^{Cs-137} = 7,6 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³) в зоне задымления около фронта огня была зафиксирована ГСП «Чернобыльский спецкомбинат» около с. Ст. Красница 28 апреля 2015 г. при максимальных уровнях радионуклидного загрязнения территории пожара в северной части, которая в 3 раза превышала контрольный уровень для ^{90}Sr (см. табл. 2).

За счет гравитационного осаждения радиоактивных аэрозолей (скорость сухого осаждения $v = 0,01$ м/с) загрязнение поверхности кожи и спецодежды участников пожаротушения за 10-часовой (36000 с) рабочий день $A_{s_skin}^i = A_v^i \cdot v \cdot 36000$ Бк/м² будет на порядки ниже допустимых уровней загрязнения поверхности (100 бета-част./(см²·мин) и 1 альфа-част./(см²·мин)) [13].

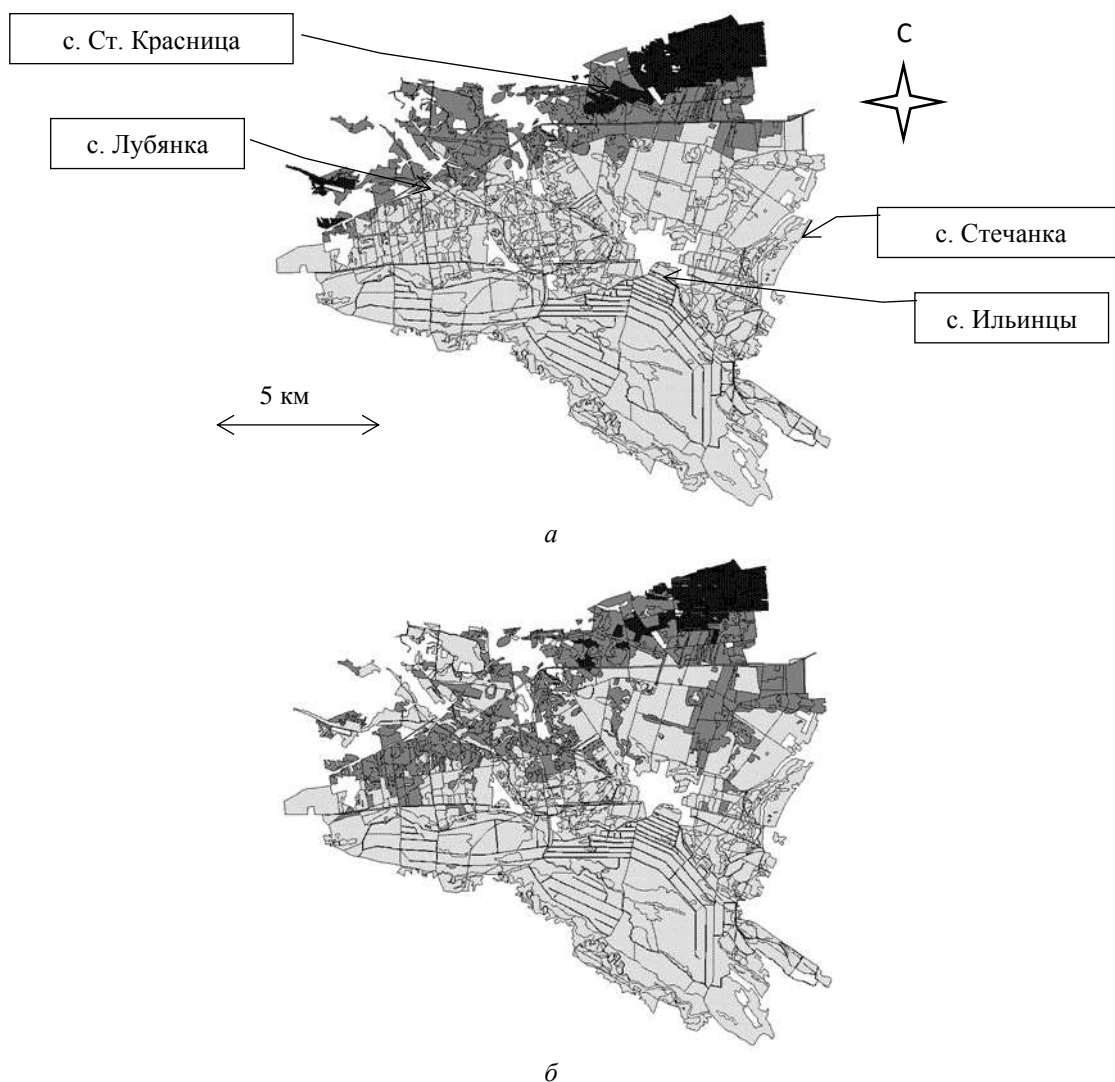
Данные о плотности радионуклидного загрязнения территории (A_s^i) и удельная объемная активность радионуклидов в воздухе (A_v^i) позволили оценить дополнительные (без учета природного радиоактивного фона) ожидаемые эффективные дозы внешнего ($D_{ext}(t)$, (5)) и внутреннего облучения ($D_{int}(t)$, (6)), а также суммарную ожидаемую эффективную дозу облучения (D_{Tot} , (7)) взрослого человека при тушении лес-

ного пожара в течение 1 ч работы 26 - 29 апреля 2015 г. (см. рисунок). 26 - 27 апреля при тушении луговых и низовых лесных пожаров на площади с относительно низкой плотностью радионуклидного загрязнения территории дополнительная ожидаемая эффективная доза внешнего облучения за 1 ч работы не превышала 0,1 мкЗв/ч, а внутреннего – 0,01 мкЗв/ч, что соответствует среднему облучению населения Земли от естественного природного фона ($D_{ext}(t=1) = 0,1$ мкЗв/ч, диапазон 0,07 ÷ 0,23 мкЗв/ч и $D_{int}(t=1) = 0,18$ мкЗв/ч, диапазон 0,05 ÷ 1,3 мкЗв/ч).

Максимальная ожидаемая эффективная доза облучения участников пожаротушения на северном участке пожара (кварталы 306 - 308) с максимальной плотностью радионуклидного загрязнения за 1 ч работы не превышала $D_{Tot}(t=1) \leq 0,97$ мкЗв/ч, при этом $D_{ext}(t=1) \leq 0,64$ мкЗв/ч и $D_{int}(t=1) \leq 0,37$ мкЗв/ч.

Обсуждение

В течение 26 - 27 апреля 2015 г. при тушении луговых пожаров суммарная ожидаемая эффективная доза облучения от чернобыльских радионуклидов участников пожаротушению при 10-часовом рабочем дне не превысила 2 мкЗв и за 28 - 29 апреля – 40 мкЗв при работе на наиболее



Повыделенные картосхемы ожидаемых эффективных доз облучения участников пожаротушения 26 - 29 апреля 2015 г. за 1 ч работы около фронта огня, мкЗв:

<i>a</i> - внешнего		< 0,1		0,1 - 0,3		0,3 - 0,64
<i>б</i> - внутреннего		< 0,01		0,01 - 0,1		0,1 - 0,37

загрязненном северном участке пожара (см. рисунок). При этом менее трети ожидаемой эффективной дозы могло быть связано с внутренним облучением при тушении лесных пожаров. Суммарная ожидаемая эффективная доза облучения участников пожаротушения 26 - 29 апреля 2015 г. не превышала $D_{Tot}(t=40) < 42$ мкЗв, что было значительно ниже контрольных уровней индивидуальных доз ($D_{Tot-cont} = 3000$ мкЗв/год) внешнего ($D_{ext-cont} = 2300$ мкЗв/год) и внутреннего ($D_{int-cont} = 700$ мкЗв/год) облучения персонала ЗО, который непосредственно не выполняет работы по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

На всей рассматриваемой территории пожара 26 - 29 апреля 2015 г. отношение ожидаемых эффективных доз внешнего и внутреннего облучения за время t :

$$D_{ext} / D_{int} = 0,77 \cdot \sum_{i=1}^6 A_s^i \cdot B_{sy}^i / \left(3 \cdot \sum_{i=1}^6 A_v^i \cdot B_{inh}^i \right), \quad (8)$$

$D_{ext} / D_{int} > 1$ при лесных пожарах и $D_{ext} / D_{int} > 10$ при луговых пожарах травы. При лесных пожарах более половины ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения (D_{int}) формировалось за счет ингаляции ^{90}Sr при максимальном значении $B_{inh}^1 = 0,15$ кЗв/Бк (АМАД = 1 мкм и класс растворимости S, см. табл. 1), а не трансурановых элементов ($^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am), как считалось ранее [2]. При луговых пожарах ингаляционное поступление ^{90}Sr , $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am дают приблизительно равные вклады (третью часть) в ожидаемую эффективную дозу внутреннего облучения участников пожаротушения. Даже в случае использования для ^{90}Sr более низкого значения дозового коэффициента $B_{inh}^1 = 0,025$, мкЗв/Бк (АМАД = 1 мкм и классе растворимости F, см. табл. 1) его вклад в форми-

рование ожидаемой дозы внутреннего облучения участников пожаротушения будет превышать 20 %. Вклад бета-излучающего ^{241}Pu в формирование ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения персонала соизмерим с вкладом каждого из альфа-излучающих радионуклидов плутония ($^{238, 239, 240}\text{Pu}$) и должен учитываться.

Для чисто конденсационных следов радиоактивных выпадений ^{137}Cs (A_S^2) за пределами ЗО или после аварии на АЭС Фукусима при отсутствии значимого загрязнения территории ^{90}Sr , $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am ($A_S^{1,3-6} = 0$) эффективная доза облучения участников пожаротушения от внешнего облучения будет всегда на 1-2 порядка величины превышать ожидаемую эффективную дозу от внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления ^{137}Cs даже без применения средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). Это хорошо согласуется с выводом, полученным ранее при проведении активного эксперимента при лесном пожаре на конденсационных следах загрязнения ^{137}Cs территории около пгт. Полесское за пределами ЗО [4]. Для широкого круга сценариев лесных пожаров на территориях, загрязненных только чернобыльским ^{137}Cs , вклад ингаляционной дозы в общую эффективную дозу облучения участников пожаротушения чернобыльскими радионуклидами не будет превышать нескольких процентов.

Для территорий ЗО даже на топливных следах радиоактивных выпадений при максимальных уровнях загрязнения территории ^{90}Sr , $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am в настоящее время при лесных и луговых пожарах эффективная доза внешнего облучения будет превышать ожидаемые дозы внутреннего облучения для участников пожаротушения даже без применения СИЗОД [2]. Следует отметить, что в работе [2] ожидаемые дозы внутреннего облучения при максимальных концентрациях радионуклидов в воздухе во время активных экспериментов с луговыми и лесными пожарами на топливных следах радиоактивных выпадений около ЧАЭС даже при применении максимальных значений дозовых коэффициентов для всех радионуклидов B_{inh}^i (см. табл. 1) и учета вклада в суммарную дозу ^{241}Pu и ^{241}Am , что не было сделано ранее, были завышены в 3 - 5 раз. При этом вклад ^{90}Sr в формирование общей ожидаемой внутренней дозы облучения участников пожаротушения (D_{int}) составлял $23 \div 47 \%$, а эффективная доза от внешнего облучения значительно превышала ожидаемую дозу от внутреннего облучения ($D_{ext}/D_{int} = 5 \div 21$ раз) даже в ближней зоне ЧАЭС, загрязненной частицами облученного ядерного топлива.

Выводы

В результате проведенной работы было установлено, что 26 - 29 апреля 2015 г. при тушении луговых и лесных пожаров суммарная ожидаемая эффективная доза облучения от чернобыльских радионуклидов участников пожаротушению при 10-часовом рабочем дне не превышала $D_{Tot}(t = 40) < 42$ мкЗв, что значительно ниже контрольных уровней индивидуальных доз ($D_{Tot-cont} = 3000$ мкЗв/год) облучения персонала ЗО. При лесных пожарах более половины ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения может быть обусловлено ингаляцией ^{90}Sr . При луговых пожарах ингаляционное поступление ^{90}Sr , $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am может давать приблизительно равные вклады (третью часть) в ожидаемую эффективную дозу внутреннего облучения участников пожаротушения. Вклад бета-излучающего ^{241}Pu в формирование ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения персонала соизмерим с вкладом каждого из альфа-излучающих радионуклидов плутония ($^{238, 239, 240}\text{Pu}$) и должен учитываться.

Для территорий ЗО даже на топливных следах радиоактивных выпадений при максимальных уровнях загрязнения территории ^{90}Sr , $^{238-241}\text{Pu}$ и ^{241}Am по отношению к ^{137}Cs в настоящее время при лесных и луговых пожарах эффективная доза от внешнего облучения будет превышать ожидаемые дозы от внутреннего облучения для участников пожаротушения.

Доза внешнего облучения участников пожаротушения может быть уменьшена за счет минимизации времени пребывания на территории с высокой плотностью загрязнения ^{137}Cs и экранирования гамма-излучения материалом кабин машин (до 10 раз) при использовании технических средств (автомобилей, тракторов и т.п.), а также за счет поглощения гамма-излучения в воздухе при применении непрямых методов и авиации для тушения лесных пожаров. Доза внутреннего облучения участников пожаротушения может быть уменьшена в десятки и сотни раз за счет использования СИЗОД (эффективность удержания радиоактивных аэрозолей микронного размера фильтрами из ткани Петрянова, используемой в респираторах, превышает 98 %), а также герметизированных кабин машин и механизмов. Следует особо отметить, что общегигиенические нормативы требуют применения средств индивидуальной и коллективной защиты во время тушения пожаров независимо от уровней радионуклидного загрязнения территории.

Описанный и используемый в настоящей работе алгоритм и подходы были реализованы при поддержке ОБСЕ в программном модуле «RadioEco» для оценки ожидаемых эффективных доз облучения участников пожаротушения на всей территории ЗО в Украине.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Thiry Y., Colle C., Yoschenko V. et al.* Impact of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantings on long term ^{137}Cs and ^{90}Sr recycling from a waste burial site in the Chernobyl red Forest // *J. of Environmental radioactivity*. - 2009. - Vol. 100, Iss. 12. - P. 1062 - 1068.
2. *Yoschenko V.I., Kashparov V.A., Protsak V.P. et al.* Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments // *J. of Environmental Radioactivity*. - 2006. - Vol. 86, Iss. 2. - P. 143 - 163.
3. *Переволоцкий А.Н.* Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах. - Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2006. - 255 с.
4. *Kashparov V.A., Lundin S.M., Kadygrib A.M. et al.* Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters // *J. of Environmental Radioactivity*. - 2000. - Vol. 51. - P. 281 - 298.
5. *Yoschenko V.I., Kashparov V.A., Levchuk S.E. et al.* Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process // *J. of Environmental Radioactivity*. - 2006. - Vol. 87, Iss. 3. - P. 260 - 278.
6. *Гаргер Е.* Вторичный подъем радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы. - Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2008. - 192 с.
7. *Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Руденко О.В.* Вивчення процесу надходження радіонуклідів у повітря при пожежах у лісах зони відчуження ЧАЕС // *Проблемы пожарной безопасности*. - 2011. - Вып. 30. - С. 16 - 23.
8. *IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. General Safety Requirements Part 3* No. GSR Part 3 (Interim). - Vienna: IAEA, 2011. - 303 p.
9. *Eckerman K.F., Ryman J.C.* External exposure to radionuclides in air, water, and soil // *Federal guidance report No. 12, EPA-402-R-93-081, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, USA*. - 1993. - 238 p.
10. *Evangelidou N., Zibtsev S., Myroniuk V. et al.* Resuspension of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant (CNPP) in 2015: An impact assessment // *Environment International*. - 2015. (In press).
11. *Bugai D., Dewiere L., Kashparov V., Ahamdach N.* Strontium-90 transport parameters from source term to aquifer in the Chernobyl Pilot Site // *Radioprotection - Colloques*. - 2002. - Vol. 37-C1. - P. 11 - 16.
12. *Kashparov V., Yoschenko V., Levchuk S. et al.* Radionuclide migration in the experimental polygon of the Red Forest waste site in the Chernobyl zone - Part 1: Characterization of the waste trench, fuel particle transformation processes in soils, biogenic fluxes and effects on biota // *Applied Geochemistry*. - 2012. - Vol. 27, No. 7. - P. 1348 - 1358.
13. *Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), Державні гігієнічні нормативи*. - К., 1998.
14. *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and fresh-water environments*. - Vienna: IAEA-TRS-472, 2010. - 194 p.
15. *Tables and Models of Growth and Productivity of Forests of Major Forest Forming Species of Northern Eurasia (Standard and reference materials), Federal agency of forest management and International institute for applied systems analysis*, - Moscow, 2008. - 886 p.
16. *Evangelidou N., Balkanski Y., Cozic A. et al.* Wildfires in Chernobyl-contaminated forests and risks to the population and the environment: A new nuclear disaster about to happen? // *Environment International*. - 2014. - Vol. 73. - P. 346 - 358.

В. О. Кашпаров¹, М. А. Журба¹, С. І. Кіреєв², С. В. Зібцев¹, В. В. Миронюк¹

¹ *Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ*

² *Державне спеціалізоване підприємство «Чернобильський спецкомбінат», Чернобиль*

ОЦІНКА ОЧІКУВАНИХ ДОЗ ОПРОМІНЕННЯ УЧАСНИКІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ У КВІТНІ 2015 р.

На підставі даних про площу та види пожежі в чернобильській зоні відчуження 27 - 29 квітня 2015 р., рівні радіонуклідного забруднення території та горючого матеріалу оцінено очікувані ефективні дози для учасників пожежогасіння, що за одну годину роботи не перевищували 0,64 мкЗв від зовнішнього і 0,37 мкЗв від внутрішнього опромінення. Показано, що очікувана ефективна доза від внутрішнього опромінення чернобильськими радіонуклідами була нижчою від дози зовнішнього опромінення. Під час лісових і лугових пожеж у зоні відчуження в даний час ^{90}Sr і ^{241}Pu , поряд з $^{238-240}\text{Pu}$ та ^{241}Am , вносять найбільш суттєвий внесок у формування сумарної дози внутрішнього опромінення.

Ключові слова: ^{90}Sr , ^{137}Cs , плутоній, америцій, радіоекологія, радіонуклідне забруднення, Чернобильська аварія, зона відчуження, лісова радіоекологія, лісові пожежі, лугові пожежі, дози опромінення.

V. A. Kashparov¹, M. A. Zhurba¹, S. I. Kireev², S. V. Zibtsev¹, V. V. Myroniuk¹

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

² State Specialized Enterprise "Chernobyl special combine", Chornobyl

EVALUATION OF THE EXPECTED DOSES OF FIRE BRIGADES AT THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE IN APRIL 2015

Assessment of area and behavior of large wildfire in the Chornobyl Exclusion Zone (ChEZ) which has been burning during April 27 - 29, 2015. Levels of radionuclide contamination of combustible material show that expected effective dose of firefighters during one fire-line hour did not exceed 0.64 μSv in case of external exposure and 0.37 μSv in case of internal exposure. It is shown that the expected effective dose of internal exposure of firefighters during suppression of wildfires in ChEZ were below the dose from external exposure. At the moment exposure of ^{90}Sr and ^{241}Pu (along with ^{238}Pu and ^{241}Am) make the most significant contribution to the internal dose of firefighters during forest and grassland fires suppression in the ChEZ.

Keywords: ^{90}Sr , ^{137}Cs , plutonium, americium, radioecology, radionuclides contamination, the Chornobyl accident, exclusion zone, forest ecosystems, forest fires, grass fires, radiation dose.

REFERENCES

1. Thiry Y., Colle C., Yoschenko V. et al. Impact of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantings on long term ^{137}Cs and ^{90}Sr recycling from a waste burial site in the Chernobyl red Forest // *J. of Environmental radioactivity*. - 2009. - Vol. 100, Iss. 12. - P. 1062 - 1068.
2. Yoschenko V.I., Kashparov V.A., Protsak V.P. et al. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments // *J. of Environmental Radioactivity*. - 2006. - Vol. 86, Iss. 2. - P. 143 - 163.
3. Perevolotskij A.N. ^{137}Cs and ^{90}Sr Distribution in the forest Biogeocenoses. - Gomel': RNIUP «Institut radiologii», 2006. - 255 p. (Rus)
4. Kashparov V.A., Lundin S.M., Kadygrib A.M. et al. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters // *J. of Environmental Radioactivity*. - 2000. - Vol. 51. - P. 281 - 298.
5. Yoschenko V.I., Kashparov V.A., Levchuk S.E. et al. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process // *J. of Environmental Radioactivity*. - 2006. - Vol. 87, Iss. 3. - P. 260 - 278.
6. Garger E. Secondary lifting of radioactive aerosols in the atmospheric boundary layer. - Chernobyl: In-t problem bezopasnosti AES NAN Ukrainy, 2008. - 192 p. (Rus)
7. Azarov S.I., Sidorenko V.L., Rudenko O.V. // Problemy pozharnoj bezopasnosti. - 2011. - Iss. 30. - P. 16 - 23. (Ukr)
8. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3 (Interim). - Vienna: IAEA, 2011. - 303 p.
9. Eckerman K.F., Ryman J.C. External exposure to radionuclides in air, water, and soil // Federal guidance report No. 12, EPA-402-R-93-081, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, USA. - 1993. - 238 p.
10. Evangelidou N., Zibtsev S., Myroniuk V. et al. Resuspension of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant (CNPP) in 2015: An impact assessment // *Environment International*. - 2015. (In press).
11. Bugai D., Dewiere L., Kashparov V., Ahamdach N. Strontium-90 transport parameters from source term to aquifer in the Chernobyl Pilot Site // *Radioprotection - Colloques*. - 2002. - Vol. 37-C1. - P. 11 - 16.
12. Kashparov V., Yoschenko V., Levchuk S. et al. Radionuclide migration in the experimental polygon of the Red Forest waste site in the Chernobyl zone - Part 1: Characterization of the waste trench, fuel particle transformation processes in soils, biogenic fluxes and effects on biota // *Applied Geochemistry*. - 2012. - Vol. 27, No. 7. - P. 1348 - 1358.
13. Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97), State Hygienic. - Kyiv, 1998. (Ukr)
14. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and fresh-water environments. - Vienna: IAEA-TRS-472, 2010. - 194 p.
15. Tables and Models of Growth and Productivity of Forests of Major Forest Forming Species of Northern Eurasia (Standard and reference materials), Federal agency of forest management and International institute for applied systems analysis, - Moscow, 2008. - 886 p.
16. Evangelidou N., Balkanski Y., Cozic A. et al. Wildfires in Chernobyl-contaminated forests and risks to the population and the environment: A new nuclear disaster about to happen? // *Environment International*. - 2014. - Vol. 73. - P. 346 - 358.

Надійшла 02.10.2015
Received 02.10.2015