

А. А. Дворник, А. М. Дворник

ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь
УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», г. Гомель, Республика Беларусь

РАДИАЦИОННАЯ ОПАСНОСТЬ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГОРЮЧИХ КОМПОНЕНТОВ ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

В статье приводятся результаты исследований, проводимых в течение 2011–2013 гг. В работе получены актуальные данные о содержании ^{137}Cs в дымовых аэрозолях и твердых продуктах сгорания горючих компонентов сосновых фитоценозов. Описана методика проведения полунатурных огневых экспериментов с использованием устройства для сжигания твердых материалов и отбора проб для анализа веществ, находящихся в дыме. Проанализирована радиационная опасность продуктов сгорания лесных горючих материалов загрязненных радионуклидами.

➤ **Ключевые слова:** лесные пожары, радиоактивные продукты сгорания, аэрозоли, дымовые выбросы, радиационная опасность.

Введение

В результате взрыва четвертого энергоблока на ЧАЭС и пожара активной зоны примерно 3–4% радиоактивных веществ было выброшено в окружающую среду. По оценкам экспертов суммарная активность веществ, выброшенных в окружающую среду, составила, до $14 \cdot 10^{18}$ Бк, в том числе $1,8 \cdot 10^{18}$ Бк ^{131}I ; $0,085 \cdot 10^{18}$ Бк ^{137}Cs ; $0,01 \cdot 10^{18}$ Бк ^{90}Sr ; $3 \cdot 10^{15}$ Бк изотопов плутония [1].

В Беларуси более 1,7 млн. га (18,8 %) лесного фонда загрязнено радионуклидами (территории с плотностью загрязнения ^{137}Cs свыше 37 кБк/м²). Из общего количества лесхозов Беларуси радиоактивное загрязнение выявлено в 49 (по состоянию на 01.01.2013) [2]. Значительные площади радиоактивно загрязненных лесов расположены в Гомельской (49,0 % общей площади ГПЛХО) и Могилевской (36,0 %) областях.

Исследование лесных пожаров в зонах радиоактивного загрязнения и переноса радионуклидов с дымовым облаком является весьма трудной научной задачей в связи с многофакторностью и сложностью изучаемого явления. Радиационная опасность лесных пожаров тесно связана с радиационно-лесоводственными характеристиками насаждений, метеорологическими условиями, а также законами термодинамики и аэродинамики.

При крупных пожарах в атмосферу выбрасывается большое количество загрязняющих веществ в виде аэрозолей, сажи и пепла. Выбросы в атмосферу продуктов горения могут приводить к локальным и региональным климатическим последствиям. Образование твердых продуктов сгорания (зола, продукты неполного сгорания) увеличивает концентрацию радионуклидов на местах возгораний и усиливает их миграцию внутри экосистемы (миграция в почве, миграция в системе «почва – растение»). Внешняя миграция радионуклидов из экосистемы путем воздушного переноса может приводить к вторичному радиоактивному загрязнению территорий, отдаленных от очага возгорания.

В период с 2005 по 2012 гг. в 30-км зоне (территория ПГРЭЗ) произошло свыше 20 пожаров различной интенсивности. За аналогичный период в радиусе 100 км количество пожаров было значительно выше. Так, на территории Ветковского спецлесхоза было зарегистрировано около 40 случаев возгораний. При этом свыше 90 % всех случаев были вызваны антропогенным фактором.

Особую опасность представляют дымовые выбросы, содержащие радионуклиды, осажденные на мелкодисперсной (респираторной) аэрозольной фракции. Радиоактивные аэрозоли – это аэрозоли, в состав которых входят частицы, полностью или частично состоящие из радионуклидов, которые либо входят в материал частиц, либо присоединяются к неактивным частицам в результате коагуляции или механического осаждения. Ингаляционное поступление радиоактивных аэрозолей может давать вклад во внутреннюю дозу облучения лиц, участвующих в тушении пожаров и в лесохозяйственных работах на местах возгораний.

Целью настоящей работы является оценка радиационной опасности твердых и газообразных продуктов сгорания лесных горючих материалов для населения и лиц участвующих в пожаротушении. В работе представлены результаты проведения полунатурного огневого эксперимента по оценке активности ^{137}Cs в твердых продуктах сгорания лесных компонентов, а также в дымовых аэрозолях.

Методика исследования

Объектами исследований являлись сосновые фитоценозы, расположенные как в 30-километровой зоне радиоактивного загрязнения (территория ПГРЭЗ, «ближний» след радиоактивного загрязнения), так в зонах радиоактивного загрязнения, удаленных от ЧАЭС (территория Ветковского спецлесхоза, «дальний» след радиоактивного загрязнения). Целесообразность выбора объектов исследования продиктована тем, что сосновая формация в Гомельской области занимает свыше 60% лесопокрытой площади, при общей лесистости равной 43 %. Сосняки мшистые при этом занимают 44%, черничные 20,1% и вересковые 6,8% от площади сосновой формации. Выбранные типы леса являются также наиболее горимыми. Экспериментальная часть исследований проводилась с использованием устройства для сжигания твердых материалов и отбора проб для анализа веществ, находящихся в дыме. Принципиальная схема установки приводится на рис. 1. Более подробное описание устройства приводится в [3]. В качестве горючих материалов использовались образцы наземной лесной растительности, а также лесная подстилка, отобранные в сосновых лесах в различных радиационно-лесоводственных условиях. Размер площадок для отбора составлял 50×50 см, а количество их варьировалось от 10 до 15 [4]. Образцы лесной подстилки с каждой площадки отбирались послойно (неразложившаяся (A_0L) и полуразложившаяся ($A_0F + A_0H$)). Образцы травянистой растительности, мелких ветвей диаметром до 7 мм и сухих шишек отбирались с дополнительных учетных площадок с размером 1 м^2 в 5 повторностях.

Устройство может работать в двух температурных режимах: тление ($200\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$) и горение (свыше $600 \text{ }^\circ\text{C}$). В режиме горения создается концентрированный дымовой поток, в то время как при тлении дымовой поток разрежен. Контроль температур осуществлялся при помощи термопарного датчика ТХА-1199, присоединенного к комбинированному электроизмерительному прибору Mastech M838. Прибор фиксирует напряжение (мВ), создаваемое на датчике, при повышении температуры. Показатели напряжения фиксировались и наносились на калибровочный график, по которому определяли значения температур. Погрешность измерений составила $\pm 20\%$.

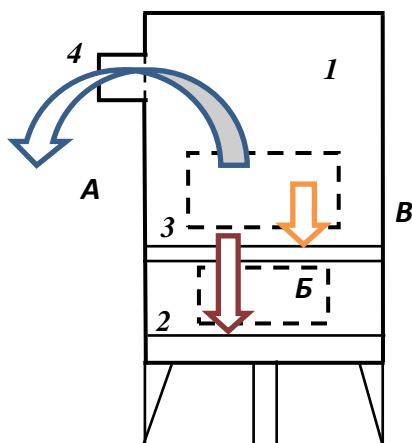


Рис. 1. Принципиальная схема устройства дымовой камеры: А – образование аэрозолей, Б – зола, В – продукты неполного сгорания

Один цикл работы устройства включал следующие этапы:

- предварительная подготовка образца ЛГМ;
- сжигание образца;
- отбор аэрозолей и РПС;
- очистка дымовой камеры и выносного блока от остаточных продуктов горения.

Отбор аэрозолей производился при достижении в камере сгорания рабочей температуры в $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Дымовые аэрозоли отбирались при помощи переносной ФВУ ПУ-3Э/12 (ПУ-3Э/220) с суммарный расходом воздуха не менее 200 л/мин . При работе с дымовыми аэрозолями использовались аналитические фильтры АФА-ВП-10, выполненные из перхлорвинила. Рабочая поверхность 10 см^2 , при среднем диаметре пор $1,5 \text{ мкм}$; максимальная рабочая температура $+60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для отбора радиоактивных продуктов сгорания устройство оборудовано выносным блоком, который извлекается из корпуса. Зола отбирали из зольника, а продукты неполного сгорания горючих компонентов – с колосниковой решетки. Образцы твердых продуктов сгорания, по причине высокой остаточной температуры, помещали в промаркированные стеклянные емкости с завинчивающейся

крышкой. По окончании отбора, фильтры АФА извлекались из держателей и помещались в полиэтиленовые пакеты с соответствующей маркировкой (шифр образца, дата и время отбора).

В рамках исследования было проведено пять серий опытов в пяти повторностях каждая. Количество отобранных образцов составило 25 проб для аэрозолей и 75 – для твердых продуктов сгорания.

К измерениям аэрозольные фильтры подготавливали путем последовательного трехкратного растворения их в 7н HNO_3 при доведении раствора до температуры кипения. После каждой повторности следовало отделение фильтрата. После третьей повторности объем фильтрата довели до объема измерительной кюветы 1н раствором HNO_3 .

Измерения удельной активности ^{137}Cs проводили с использованием гамма-спектрометра производства CANBERRA Packard (США) с коаксиальным полупроводниковым детектором Ge(Li) расширенного энергетического диапазона. Диапазон измерения энергий γ -излучения – 40–10 000 кэВ. Относительная эффективность регистрации спектра для энергии 1,33 МэВ – 22,4%. Относительная ошибка измерения удельной активности ^{137}Cs в пробах составляла от 5 до 10% в зависимости от активности образца. Минимально детектируемая удельная активность ^{137}Cs 3 Бк за время измерения 1 час в геометрии 0,1 л «дента». Энергия в 1 МэВ регистрируется в 4096 канале. Геометрия измерений: сосуд Маринелли, 1 л; цилиндрический сосуд диаметром 7 см, высотой 3,2 см, «дента»; цилиндрический сосуд диаметром 2,5 см, высотой 5 см.

Результаты исследования и их обсуждение

Характер распределения удельной активности ^{137}Cs в твердых продуктах сгорания в сосняках различных типов не имеет принципиальных отличий. Доля активности ^{137}Cs в твердых продуктах сгорания варьирует в относительно узком диапазоне. Этот показатель составляет 53–60% и 40–47% для золы и продуктов неполного сгорания соответственно. Наибольшее содержание ^{137}Cs зафиксировано в золе. Несколько меньше удельная активность в продуктах неполного сгорания горючих материалов, что объясняется наличием несгоревших частей лесной подстилки и опада. Данные рис. 2 показывают, что удельная активность золы превышает удельную активность горючих компонентов сосновых фитоценозов в 3 раза, что связано, в первую очередь, с эффектом концентрации радионуклидов в продуктах сгорания. Показатели удельной активности продуктов сгорания различаются для «ближней» и «дальней» зоны радиоактивного загрязнения в 4–5 раз.

Анализ механического состава несгоревших ЛГМ показал, что растительный материал после сгорания распределяется по двум основным фракциям:

– обугленные фрагменты древесных побегов, а также части опада и неразложившегося слоя лесной подстилки;

– зольная фракция, которая часто смешивается с минеральными примесями, содержащимися в лесной подстилке разной степени разложения.

Важным фактором в формировании пожарной опасности в лесных фитоценозах является влажность растительных материалов, подверженных воспламенению. Именно дефицит влаги горючих компонентов увеличивает степень пожарной опасности в лесах. При высокой влажности горючих материалов отмечается отсутствие воспламенения, что позволяет судить о наличии предельного влагосодержания лесных растительных материалов, при котором невозможно возгорание. Для лесной подстилки сосновых фитоценозов воспламенение материала является проблематичным при влажности свыше 50%. При сжигании образцов с влагосодержанием 50–55% отмечалось повышенное дымообразование, вероятно, связанное с интенсивным испарением влаги при подсушивании фитомассы. При этом процесс горения имел непродолжительный характер.

Содержание ^{137}Cs в дымовых аэрозолях. Важнейшим компонентом радиоактивных продуктов сгорания являются дымовые аэрозоли. Активность аэрозолей может зависеть от нескольких факторов: плотности загрязнения лесных горючих материалов, вовлеченных в процесс горения, плотности дымового потока, времени экспозиции. На рис. 3 приведены данные о объемной активности ^{137}Cs в дымовых аэрозолях, образовавшихся при сгорании наземной группы горючих материалов с различной плотностью загрязнения.

Установлено, что в режиме горения максимальные значения объемной активности ^{137}Cs в аэрозолях составили: $(0,84 \pm 0,04) \text{ Бк/м}^3$ при сгорании лесных горючих материалов «дальнего» следа радиоактивного загрязнения и $(838 \pm 134) \text{ Бк/м}^3$ при сгорании лесных горючих материалов «ближнего» следа. При отборе в режиме тления максимальные значения объемной активности составили: $(0,169 \pm 0,021) \text{ Бк/м}^3$ для образцов «дальнего» следа радиоактивного загрязнения и $(74 \pm 15,1) \text{ Бк/м}^3$ для образцов «ближнего» следа. Сопоставление полученных данных с фоновыми значениями позволило констатировать превышение объемной активности ^{137}Cs в дымовых аэрозолях в $2,7 \cdot 10^3$ раз при сго-

рании растительного материала из «дальней» зоны загрязнения. При сгорании горючих материалов, отобранных в 30-км зоне радиоактивного загрязнения объемная активность ^{137}Cs в аэрозольной составляющей радиоактивных продуктов сгорания превысила фоновые значения, по минимальным подсчетам в $2,3 \cdot 10^4$ раз. В качестве фоновых величин были выбраны значения объемной активности ^{137}Cs в атмосферном воздухе в зонах радиоактивного загрязнения (без задымления). При этом было установлено, что в аэрозоли переходит от 3 до 5% активности ^{137}Cs в сгораемых материалах.

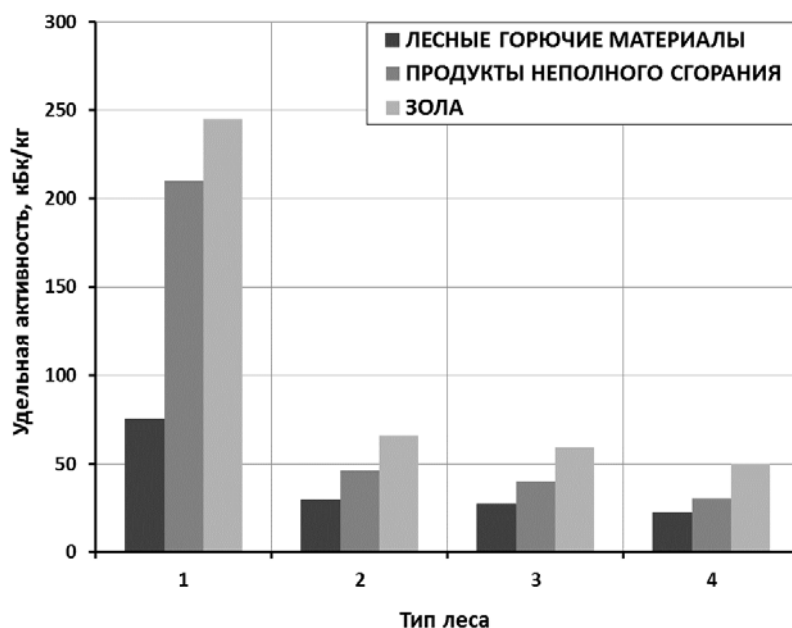


Рис. 2. Средняя удельная активность ^{137}Cs в твердых продуктах сгорания: 1 – сосняк мишустый («ближняя» зона); 2 – сосняк вересковый («дальняя» зона); 3 – сосняк мишустый («дальняя» зона); 4 – сосняк черничный («дальняя» зона)

Аналогичные данные были получены в 1992 году лабораторией лесной пирологии ВНИИЛХа, при проведении эксперимента в условиях контролируемого низового пожара на территории с плотностью загрязнения по ^{137}Cs от 555 кБк/м^2 до 1480 кБк/м^2 [5]. Авторами эксперимента отмечается варьирование значений объемной активности ^{137}Cs в дыме в диапазоне $0,022\text{--}1,73 \text{ Бк/м}^3$. Сравнение этих величин с данными, полученными нами в ходе полунатурных экспериментов, показало совпадение результатов с погрешностью 25%.

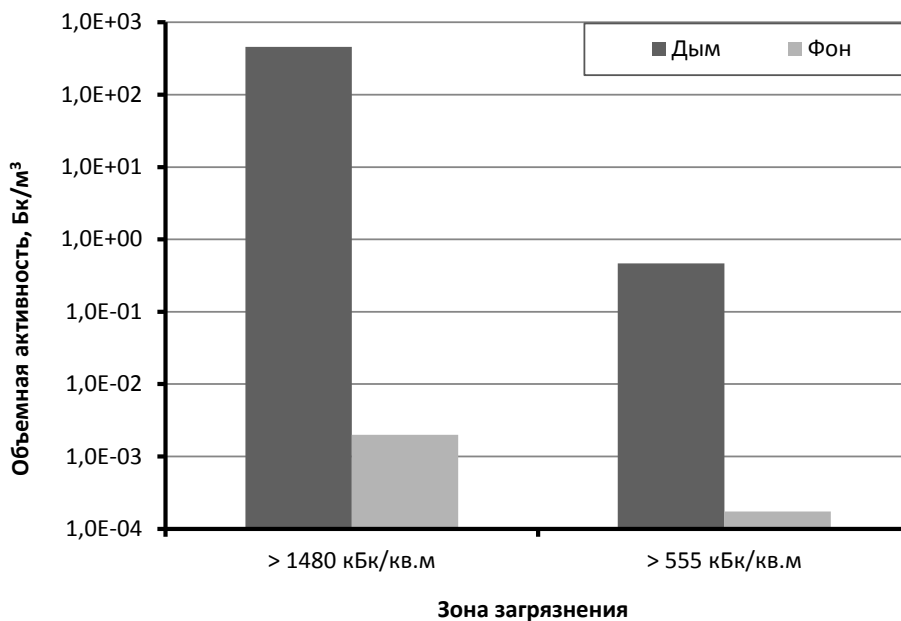


Рис. 3. Средние значения объемной активности ^{137}Cs в дымовых выбросах

Согласно данным нормативного акта ГН 2.6.1.8–127–2000 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000)» [6], допустимая среднегодовая объемная активность ^{137}Cs в воздухе, устанавливаемая для населения и лиц, участвующих в пожаротушении равны 27 Бк/м^3 и $1,7 \text{ кБк/м}^3$ и соответственно. Принимая во внимание данные нормативы, следует отметить, что дымовые выбросы, образующиеся при сгорании лесных горючих материалов с плотностью загрязнения свыше 1480 кБк/м^2 , по содержанию ^{137}Cs могут превышать допустимые объемные активности для населения ($\text{ДОА}_{\text{нас}}$), а в отдельных случаях и допустимые объемные активности для лиц участвующих в ликвидации пожара ($\text{ДОА}_{\text{пер}}$). При сгорании лесных горючих материалов на территориях с плотностью загрязнения равной 555 кБк/м^2 , превышения допустимой среднегодовой объемной активности ^{137}Cs в дымовых аэрозолях не отмечается. Однако следует учитывать тот факт, что лесные пожары явления сравнительно непродолжительные. Следовательно, воздействие радиационного фактора при этом также носит кратковременный характер. Таким образом, при непродолжительном воздействии, радиоактивные аэрозоли от лесных пожаров могут превысить суточные нормы $\text{ДОА}_{\text{нас}}$ и $\text{ДОА}_{\text{пер}}$.

Таким образом, горение лесной подстилки и других растительных материалов с высоким уровнем радиоактивного загрязнения может представлять серьезную опасность для человека, находящегося в непосредственной близости от очага горения. Так, ингаляционное поступление мелкодисперсной фракции дымовой эмиссии может создать дополнительный вклад в формирование дозы внутреннего облучения организма у участников пожаротушения. Кроме того, существует определенный риск локального вторичного загрязнения прилегающих территорий радиоактивными продуктами сгорания при их ветровом переносе. Анализ пожарной обстановки в лесах на загрязненных радионуклидами территориях за период с 2006 по 2012 гг. доказывает опасность вторичного радиоактивного загрязнения прилегающей территории при верховых и низовых пожарах сильной интенсивности. Результаты сравнительного анализа приводятся в [7].

По мнению экспертов в области радиэкологии [8] одной из существенных проблем является вопрос концентрации трансурановых элементов (ТУЭ) в приземном воздухе. Будучи α -излучающими источниками ионизирующего излучения, трансурановые элементы представляют серьезную опасность для человека при ингаляционном поступлении, по сравнению со ^{137}Cs . Так, на активной стадии Чернобыльской аварии в н. п. Масаны, Крюки, Борщевка, Чамков, Красноселье (плотность загрязнения поверхности почвы $^{239, 240}\text{Pu}$ около 37 кБк/м^2) содержание ТУЭ в воздухе в течение 10–15 дней после аварии превысило ДК_b примерно в 100 раз. Лесные пожары на загрязненных радионуклидами территориях в 1992 году привели к повсеместному увеличению содержания ТУЭ в воздухе в пожароопасный сезон. При этом среднегодовое содержание $^{239, 240}\text{Pu}$ в г. Мозырь и г. Гомель в 1992 году превысило уровень 1991 года и составило 80 нБк/м^3 . Сведения о поведении трансурановых элементов в составе дымовых аэрозолей лесных пожаров, приводимые в литературных источниках довольно разрознены. Именно поэтому выработка системного подхода для анализа содержания ТУЭ в дымовых выбросах при лесных пожарах является актуальной задачей, несущей научно-практическое, экологическое и социальное значение.

Заключение

В ходе исследования были получены нижеследующие результаты.

1. Определены выходы радиоактивных продуктов сгорания и дымовых аэрозолей при сгорании лесных горючих материалов различного влагосодержания для мшистого, верескового и черничного типов сосновых насаждений.

2. Установлено, что удельная активность ^{137}Cs в радиоактивных продуктах сгорания может превышать удельную активность этого изотопа в лесных горючих материалах в 3 раза.

3. Объемная активность ^{137}Cs в дымовых выбросах пропорциональна плотности загрязнения сгораемых компонентов лесных фитоценозов. При этом переход радионуклидов в аэрозоли, при сгорании горючих материалов, составляет 3–5% от их плотности загрязнения.

4. Дымовые выбросы, образующиеся при сгорании лесных горючих материалов с плотностью загрязнения свыше 1480 кБк/м^2 , по содержанию ^{137}Cs могут превышать суточные нормы допустимой объемной активности, установленной для населения ($\text{ДОА}_{\text{нас}}$), а в отдельных случаях и допустимые объемные активности, установленные для лиц участвующих в пожаротушении ($\text{ДОА}_{\text{пер}}$).

Список использованных источников

1. González, A. J. Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine on environmental monitoring, remediation and research / A. J. González // Chernobyl: looking back

to go forward: proceedings of an international conference, Vienna, 6–7 september 2005 / IAEA. – Vienna, 2005. – p. 117 – 119

2. Домненков, В. А. Радиационная обстановка в лесах / В. А. Домненков // Лесное и охотничье хозяйство. – 2013. – № 2 – С. 19 – 29.

3. Устройство для сжигания твердых материалов и отбора проб для анализа веществ, находящихся в дыме: пат. 8964 Респ. Беларусь, МПК G 01 N 1/00, F 23 B 80/00 / А. М. Дворник, А. А. Дворник, А. Д. Наумов, А. В. Архангельский; заявитель Гомельск. гос. ун-т., Ин-т. Радиобиол. – № u20120421; заявл. 04.18.12; опубл. 11.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1. – С. 199.

4. Дворник, А. А. Оценка состояния лесных горючих материалов в сосняках Гомельской области, загрязненных радионуклидами / А. А. Дворник // Биомониторинг состояния природной среды Полесья (Беларусь-Украина-Россия): материалы междунар. научн. конф., Брест, 10-11 нояб. 2011 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; редкол.: А. Н. Тарасюк [и др.]. – Брест, 2011. – С. 167–170.

5. Душа-Гудым, С. И. Лесные пожары и содержание радиоцезия в приземном слое атмосферы / С.И. Душа-Гудым // Сб. науч. тр. / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2004. – Вып. 61 : Проблемы радиэкологии леса. Лес. Человек. Чернобыль. – С. 180–183.

6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000) : ГН 2.6.1.8–127–2000. – Введ. 19.04.2000. – Минск: Минздрав РБ : ГУ РЦГЭ, 2000. – 128 с.

7. Дворник, А. А. Перенос радионуклидов с дымом лесных пожаров / А. А. Дворник, А. М. Дворник // Современное состояние и перспективы охраны и защиты лесов в системе устойчивого развития: материалы междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 9 –11 окт. 2013 г. / Ин-т леса НАН Беларуси; редкол.: А. И. Ковалевич [и др.]. – Гомель, 2013 – С. 52–55.

8. Кудряшов, В. П. Загрязнение территории Республики Беларусь трансурановыми элементами в результате глобальных выпадений и катастрофы на Чернобыльской АЭС, включение их в трофические цепи и формирование дозовых нагрузок : автореф. дис. канд. биол. наук : 03.00.01, 03.00.16 / В. П. Кудряшов ; Ин-т радиобиологии НАН Беларуси. – Минск, 1998. – 25 с.

A. A. Dvornik, A. M. Dvornik

RADIATION HAZARDS OF COMBUSTIBLE COMPONENTS OF FOREST PHYTOCENOSISES

The results of research conducted during the 2011–2013 are presents in the article. The actual data on the concentration of ¹³⁷Cs in the smoke aerosols and solid products of combustion of forest combustible components are presents in the paper. A method of semi-natural fire experiments using the device for the combustion of solid materials, and sampling for the analysis of substances in the smoke is describes. The radiation hazard of combustion products of forest combustible materials contaminated with radionuclides has analyzed.