

УДК [504.5:628.4.047]:539.1.047

А. А. ДВОРНИК¹, А. М. ДВОРНИК²

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, e-mail: aadvornik@yandex.ru,

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

(Поступила в редакцию 16.09.2014)

Введение. При лесных пожарах на радиоактивно загрязненных территориях в воздух могут выбрасываться радиоактивные частицы, концентрация которых способна превышать допустимые объемные активности. Высвободившиеся из зоны пожара радионуклиды могут переноситься воздушными потоками на большие расстояния, что может привести к вторичному радиоактивному загрязнению прилегающей, условно чистой территории. Существует прямая связь между объемной активностью дымовых аэрозолей и их содержанием в горючих материалах лесных фитоценозов, загрязненных в результате техногенных аварий.

В результате взрыва четвертого энергоблока на ЧАЭС и пожара активной зоны примерно 3–4 % радиоактивных веществ было выброшено в окружающую среду. В Республике Беларусь более 1,7 млн га (18,8 %) лесного фонда загрязнено радионуклидами (территории с плотностью загрязнения ¹³⁷Cs свыше 37 кБк/м²) [1]. Из общего количества лесхозов Беларуси радиоактивное загрязнение выявлено в 49 (по состоянию на 01.01.2013). Значительные площади радиоактивно загрязненных лесов расположены в Гомельской (49,0 % общей площади ГПЛХО) и Могилевской (36,0 %) областях.

Экспериментальные исследования лесных пожаров на загрязненных радионуклидами территориях сопряжены со сложностью измерения пирологических и радиэкологических параметров в естественных условиях, а также скорости осаждения радиоактивных примесей из дымового облака на больших расстояниях от очага пожара. Одним из эффективных инструментов получения данных о потенциальной радиационной опасности лесных пожаров является математическое моделирование. Среди наиболее распространенных моделей можно выделить модели следующих авторов: А. М. Гришин (1981, Россия), Р. Ротермел (1972, США), В. Г. Гусев (1986, Россия), С. И. Азаров (1997, Украина), С. И. Душа-Гудым (1999, Россия), В. Г. Молодых (1997, Беларусь) и др.

Цель исследования – оценить поступление ¹³⁷Cs в атмосферу при низовых пожарах различной интенсивности и разработать математическую модель и компьютерное приложение для определения вторичного радиоактивного загрязнения прилегающей территории.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования были выбраны сосновые фитоценозы верескового, черничного и мшистого типов леса. Целесообразность выбора объектов исследования продиктована тем, что сосновая формация в Гомельской области занимает свыше 60 % лесопокрытой площади, при лесистости 43 %. На долю сосняков мшистых приходится 44 % от площади сосновой формации, сосняки черничные занимают 20,1 %, а вересковые – 6,8 %. Экспериментальные данные о запасе горючих материалов и плотности их загрязнения ¹³⁷Cs получены на девяти пробных площадях, расположенных в 30-км зоне радиоактивного загрязнения (н.п. Крюки, ППРЭЗ), а также в 150 км от ЧАЭС (дальний след радиоактивного загрязнения).

Определение количества лесных горючих материалов (ЛГМ) наземной группы проведено путем отбора 95 образцов на 9 пробных площадях. С целью получения репрезентативной выборки и статистической достоверности оценки на пробных площадях методом «конверта» закладывался ряд учетных площадок размером 50×50 см (количество площадок 10–15). Запас горючих компонентов определялся в воздушно-сухом состоянии в пересчете на 1 м².

Сжигание растительных материалов и отбор аэрозолей осуществлялись при помощи устройства для сжигания твердых горючих материалов. Полное описание устройства приведено в [2]. Отбор аэрозолей производился при достижении в камере сгорания рабочей температуры в 500 °С. Дымовые аэрозоли отбирались при помощи переносной фильтровентиляционной установки ПУ-3Э/12 (220) с суммарным расходом воздуха не менее 200 л/мин. При работе с дымовыми аэрозолями использовались аналитические фильтры АФА–ВП–10, выполненные из перхлорвинила. Условия и результаты проведения огневых экспериментов приводятся в [3]. Перед измерением удельной активности аэрозолей фильтры подготавливали путем последовательного трехкратного растворения их в 7 н HNO₃ и доведении раствора до температуры кипения. После третьей повторности объем фильтрата доводили до объема измерительной кюветы 1 н раствором HNO₃.

Радиометрические измерения проводились на γ -спектрометре 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 ¹³⁷Cs в пробах составляла от 5 до 10 %. Энергия в 1 МэВ регистрируется в 4096 канале. Геометрия измерений: сосуд Маринелли, 1 л.

Моделирование. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель радиозоологической оценки параметров лесного пожара и параметров переноса радионуклидов с дымовой эмиссией. Схема модели показана на рис. 1.

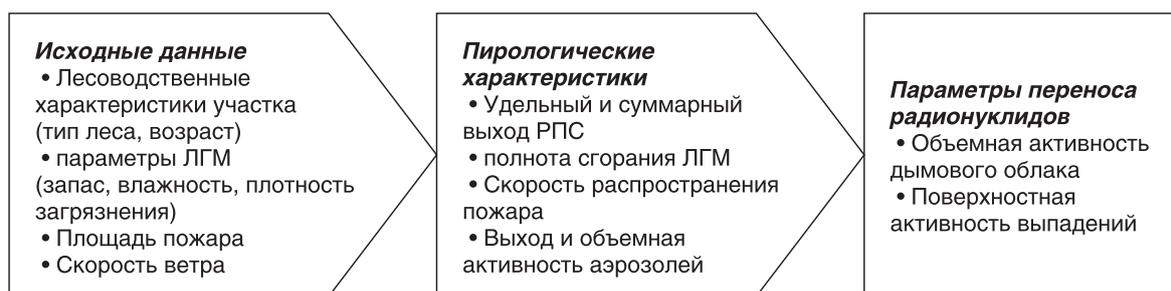


Рис. 1. Принципиальная схема модели

В модели использованы как собственные разработки, так и известные модели для расчета переноса примесей в атмосферном воздухе. Модель состоит из трех блоков: исходные данные, расчет пирологических характеристик и расчет параметров переноса. В качестве исходных данных используются радиационно-лесоводственные характеристики, метеорологические данные, а также площадь пожара. Пирологические характеристики рассчитываются по способу, изложенному в [3]. Параметры переноса радионуклидов и их осаждение рассчитываются по статистической модели Гаусса, основанной на законе нормального распределения концентраций в вертикальном и горизонтальном направлениях. Формулы для расчета фактора разбавления, функции истощения облака вследствие сухого осаждения взяты из литературных источников [4].

В данной интерпретации модель имеет следующие граничные условия:

- величина, учитывающая шероховатость поверхности z_0 , была принята равной 100 см;
- при расчете эффективной высоты выброса учитывалась теплота сгорания ЛГМ, ккал/кг;
- диапазон эффективной высоты выброса составляет 15–200 м;
- при расчете фактора метеорологического разбавления G учитывалась скорость ветра с поправкой на высоту древостоя, которая в свою очередь зависит от возраста;
- максимальное расстояние, для которого рассчитывалась поверхностная активность выпадений, равнялось 10 км.

Важное значение в оценке фактора разбавления при низовых пожарах играет высота древостоя. Высота деревьев в лесных насаждениях имеет прямо пропорциональную зависимость от возраста a (годы). Данная зависимость получена путем аппроксимации сведений, полученных из таблиц нормального хода роста сосновых насаждений [5]. Практически высоту древостоя H_i (м) можно рассчитать используя следующую расчетную формулу:

$$H_i = 1,77 + 0,43a - 0,0015a^2. \quad (1)$$

Скорость ветра имеет большие различия на высоте и под пологом леса. При этом она оказывает существенное влияние на формирование конвекционной колонки и эффективной высоты выброса поллютантов при лесных пожарах. Расчет скорости ветра на уровне травяно-кустарникового яруса леса проводился по формуле Альбини, приведенной в [6].

Плотность потока примеси у поверхности земли A_s (Бк/(см · м²)) вследствие сухого оседания рассчитывалась по формуле:

$$A_s(x, y) = v_g \cdot A_v(x, y, 0), \quad (2)$$

где $A_v(x, y, 0)$ – приземная объемная активность примеси в точке x, y , Бк/м³; v_g – скорость сухого оседания, м/с. Для изотопа ¹³⁷Cs при практических расчетах рассеяния радиоактивных выбросов v_g можно принимать равной 0,8 см/с (0,008 м/с).

Результаты и их обсуждение. С использованием данных моделирования нами были рассчитаны сценарии формирования вторичного радиоактивного загрязнения прилегающей территории под влиянием лесных пожаров различной интенсивности. В качестве исходных данных для расчета были взяты параметры реальных пожаров, произошедших на территориях дальнего следа радиоактивного загрязнения. В таблице приводится сравнение значений поверхностной активности выпадений от реальных лесных пожаров, зафиксированных на пунктах радиационного контроля (ПРК), и расчетных данных о выпадениях для низовых пожаров различной интенсивности.

Поверхностная активность выпадений при низовых пожарах различной интенсивности

Плотность загрязнения территории ¹³⁷ Cs, кБк/м ²	Удаленность очага от ПРК, км	Вид и интенсивность пожара	Площадь пожара, га	Поверхностная активность выпадений, Бк/м ²	
				Данные ПРК	Модель
185	8,1	Низовой, слабая	0,4	0,30	0,19
555	2,3	Низовой, слабая	0,3	1,70	1,24
1480	9,8	Низовой, слабая	0,35	0,20	0,16
555	7,5	Низовой, слабая	0,45	0,30	0,20
555	6,0	Низовой, слабая	0,4	0,30	0,27
555	5,1	Низовой, слабая	0,2	0,50	0,37
185	5,5	Низовой, слабая	0,2	0,20	0,32
185	6,2	Низовой, слабая	0,9	1,50	1,64
185	9,5	Низовой, слабая	0,7	0,60	0,82
555	8,8	Низовой, слабая	0,4	1,20	0,87
185	8,5	Низовой, слабая	0,8	0,80	0,95
37	9,5	Низовой, слабая	0,7	0,60	0,39
185	9,4	Низовой, слабая	0,5	0,50	0,38
185	10,0	Низовой, слабая	12	0,40	0,36
555	6,5	Низовой, слабая	0,65	0,60	0,70
555	7,1	Низовой, слабая	1	1,00	0,62
185	8,8	Низовой, слабая	0,85	0,90	0,42
185	6,5	Низовой, слабая	0,45	0,50	0,69

Каждый случай пожара рассматривался отдельно, так как при одинаковой плотности загрязнения ЛГМ факторами, определяющими активность выпадений из дымового облака, становятся площадь пожара, полнота сгорания горючих материалов и скорость ветра. Так, низовой лесной пожар слабой интенсивности на территории с плотностью загрязнения по ¹³⁷Cs, равной выше 540 кБк/м², дал сопоставимые значения радиоактивных выпадений, что и низовой лесной пожар сильной интенсивности на территории с плотностью загрязнения по ¹³⁷Cs, равной 372 кБк/м² (рис. 2).

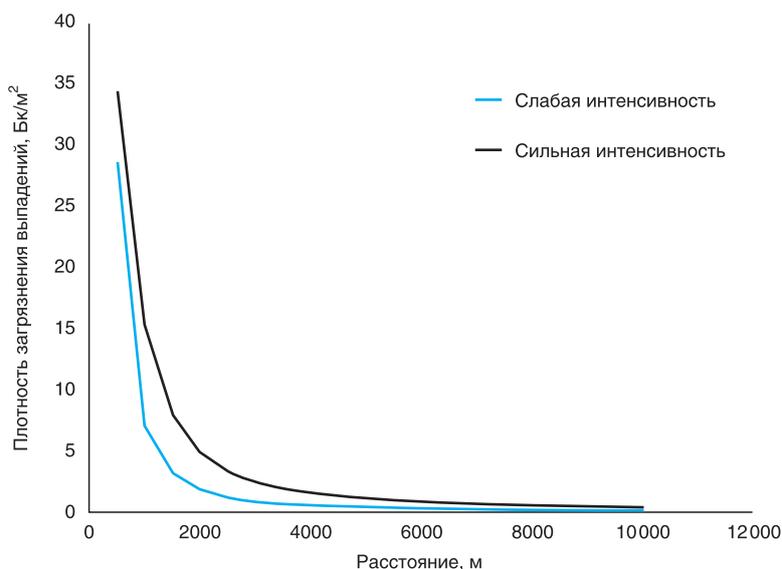


Рис. 2. Поверхностная активность выпадений при лесных пожарах различной интенсивности

Расчеты показали, что по мере увеличения расстояния поверхностная активность выпадений приближается к фоновой величине (фоновые величины – значения радиоактивных выпадений на горизонтальные планшеты в дни без лесных пожаров – составляли $0,69 \pm 0,15$ Бк/м²). Таким образом, поверхностная активность выпадений составляет менее 1 % плотности загрязнения горючих материалов, вовлеченных в процесс горения.

Модель достоверно описывает образование радиоактивных выпадений как на больших (от 5 до 10 км), так и на малых расстояниях (150–200 м). Нами был проведен сравнительный анализ данных о поверхностной активности выпадений, полученных по разработанной модели, со значениями поверхностной активности, полученными при проведении натурного огневого эксперимента в 1997 г. на территории с плотностью загрязнения свыше 1480 кБк/м². Оценка различий между результатами моделирования и экспериментальными данными проводилась с использованием парного критерия Вилкоксона. Величина критерия составила 0,24 ($df = 9$, при $p \leq 0,05$), что указывает на совпадение теоретических и эмпирических значений в пределах относительной ошибки, равной 30 %. Исходные параметры для расчета были выбраны в соответствии с условиями проведения натурного огневого эксперимента, который подробно описывается в [7]. За максимальное расстояние распространения радиоактивных примесей была принята дистанция 155 м. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

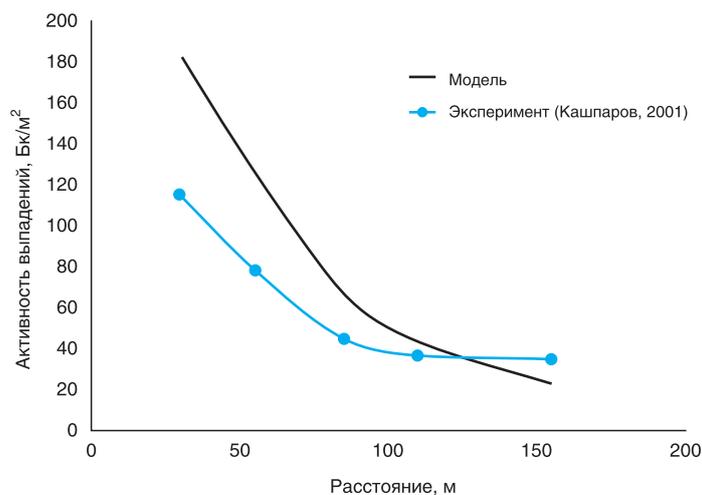


Рис. 3. Поверхностная активность выпадений на малом расстоянии от очага возгорания

Завершающим этапом моделирования является автоматизация расчетов и реализация их в виде приложения для персонального компьютера. С целью информационного обеспечения исследования была разработана информационная система FORESTFIRE. Система позволяет рассчитать возможный выброс радионуклидов при лесном пожаре на территориях, загрязненных радионуклидами, а также оценивать потенциальную возможность возникновения вторичного загрязнения территорий. Данная система может быть полезна для специалистов лесного хозяйства, службам радиационного контроля и МЧС.

Предложенная модель дает важную научно-практическую основу для оценки радиационной опасности лесных пожаров для лиц, участвующих в ликвидации последствий возгораний. В настоящее время остается актуальным вопрос о поведении трансурановых элементов в составе дымовой эмиссии лесных пожаров. Основным источником загрязнения территории Беларуси трансурановыми элементами явилась авария на ЧАЭС. Выброс указанных элементов при этом в окружающую среду по разным оценкам составил от 3 до 6 % от накопленных за весь период работы ядерного реактора. «Горячие» частицы, содержащие трансурановые элементы ($^{239,240,241}\text{Pu}$; ^{241}Am), выпали в радиусе 30 км от реактора. Сложный процесс выщелачивания данных изотопов из «горячих» частиц определил пролонгированный характер радиоактивного загрязнения близлежащих к ЧАЭС территорий. Будучи альфа-излучающими источниками трансурановые элементы представляют особую опасность при поступлении в организм человека ингаляционным путем по сравнению с ^{137}Cs .

Заключение. Предложено устройство для сжигания твердых материалов и отбора проб для анализа веществ, находящихся в дыме. Определены выходы радиоактивных продуктов сгорания (РПС) и дымовых аэрозолей при сгорании лесных горючих материалов различного влагосодержания для мшистого, верескового и черничного типов сосновых насаждений.

Разработана модель для оценки пирологических и радиоэкологических параметров низовых лесных пожаров и расчета выпадений радиоактивных примесей из дымового облака, а также компьютерное приложение для автоматизации расчетов.

Установлено, что вторичное загрязнение территории вблизи очага возгорания (до 200 м) является более высоким и представляет большую радиационную опасность для человека. Плотность загрязнения радиоактивных выпадений на дальних расстояниях (5–10 км) составляет менее 1 % плотности загрязнения лесных горючих материалов, вовлеченных в процесс горения, и приближается к фоновым значениям.

Литература

1. Домненков В. А. // Лесное и охотничье хозяйство. 2013. №2. С. 19–29.
2. Дворник А. М., Дворник А. А., Наумов А. Д., Архангельский А. В. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2013. №1. С. 199.
3. Дворник А. А. // Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук. 2013. №4. С. 93–98.
4. Гусев В. Г. // Физико-математические модели распространения пожаров и противопожарные барьеры в сосновых лесах. СПб., 2005. С. 71–74.
5. Багинский В. Ф. // Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР. М., 1984. С. 94–95.
6. Молодых В. Г. Радиоэкологические последствия лесных пожаров: (Препринт ИРЭП-4). Мн., 1993.
7. Кашипаров В. А. // Гигиена и санитария. 2001. №1. С. 30–35.

A. A. DVORNIK, A. M. DVORNIK

MODEL OF SECONDARY RADIOACTIVE CONTAMINATION OF NEAREST TERRITORIES DUE TO FOREST FIRES

Summary

Forest fires in the contaminated areas may increase the concentration of radioactive substances in the air close to the source as well as at large distances. The model of the atmospheric transport of radioactive aerosols and their loss due to dry deposition is presents in the article. The density of contamination of radioactive fallout over long distances (5–10 km) is comparable to the background values in the paper.