

УДК [504.5: 628.4.047]: 539.1.047

ДОЛГОЖИВУЩИЕ РАДИОНУКЛИДЫ В НАПОЧВЕННОМ ПОКРОВЕ СОСНОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ И ИХ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРАХ

Дворник А. А., Король Р. А., Дворник А. М.

*ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», г. Гомель, Республика Беларусь
УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», г. Гомель, Республика
Беларусь
E-mail: aadvornik@gmail.com.*

В статье приведены результаты исследования радиационной опасности продуктов сгорания компонентов сосновых фитоценозов, расположенным на радиоактивно загрязненных территориях. Показано содержание долгоживущих радионуклидов в лесных горючих материалах. Установлено, что 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.

Ключевые слова: лесные пожары, радионуклиды, лесная подстилка, радиоактивные аэрозоли, допустимая объемная активность.

ВВЕДЕНИЕ

При лесных пожарах на территориях, загрязненных радионуклидами, в воздух могут выбрасываться радиоактивные частицы, концентрация которых способна превышать допустимые объемные активности. Особую опасность представляют выбросы, содержащие радионуклиды, осажденные на мелкодисперсной (респирабельной) аэрозольной фракции, в том числе и летучие при высоких температурах (свыше 1300 °С) Sr и Pu. Ингаляционное поступление радиоактивных аэрозолей может служить источником дополнительных дозовых нагрузок для лиц, участвующих в тушении пожаров и в лесохозяйственных работах на местах возгораний. Кроме того, 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 (авария на ЧАЭС [СССР, 1986 г.], авария на производственном объединении «Маяк» [СССР, 1957 г.], авария на АЭС Фукусима-1 [Япония, 2011 г.]). Изучение указанных проблем является весьма актуальной задачей и имеет важное научное, практическое, экологическое и социально-экономическое значение.

Лесные пожары в зонах радиоактивного загрязнения могут приводить к изменению радиационной обстановки не только в очаге пожара, но и на определенном расстоянии от него: повышать концентрацию радиоактивных аэрозолей, их выпадение на поверхность земли. Многие исследователи (Огородников Б. И., Душа-Гудым С. И., Кашпаров В. А., Молодых В. Г.) отмечают ежегодное повышение объемной активности аэрозолей в воздухе в период с апреля по октябрь, что соответствует пожароопасному сезону [1, 2, 3]. Так, Б. И. Огородников показал повышение концентрации аэрозолей ^{137}Cs до 100 раз в 30 км зоне ЧАЭС во время лесных пожаров в мае 1992 года. В Беларуси максимальные среднемесячные концентрации ^{137}Cs наблюдались в мае и сентябре 2002 года в г. Гомеле около $400 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³ и в августе и сентябре в г. Пинске $526 \cdot 10^{-7}$ и $468 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³.

Научные исследования, посвященные изучению характеристик лесных пожаров и атмосферного переноса загрязняющих веществ с дымовыми выбросами, проводились в различных научных организациях стран СНГ. Основные из них: Томский государственный университет, Санкт-Петербургский НИИ лесного хозяйства, ВНИИЛХа, Украинский НИИ сельхозрадиологии, Национальный университет биоресурсов Украины, Институт радиэкологических проблем НАН Беларуси (до 2002 года), Институт леса НАН Беларуси.

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 (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am), выпали в радиусе 30 км от реактора. Сложный процесс выщелачивания данных изотопов из «горячих» частиц определили 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 со ^{137}Cs [4].

Цель настоящей работы — дать радиэкологическую оценку долгоживущим радионуклидам, содержащимся в напочвенном покрове сосновых фитоценозов, с точки зрения лесной пирологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика исследования включала отбор образцов лесного напочвенного покрова (лесной подстилки и растительности), проведение огневого эксперимента, радиохимический анализ образцов и спектрометрические измерения, а также статистическую обработку данных.

Характеристика площадей и отбор образцов

Отбор образцов лесной подстилки и растительности проводился в 2014 году на территории зоны отчуждения (30 км вокруг ЧАЭС), в районе д. Крюки (N

51°31'24,6", E 30°19'19,6"). Местом отбора послужил участок сосняка мшистого с условиями местопроизрастания А₂. Радиологическое обследование участков леса проводилось согласно методическим рекомендациям с использованием дозиметра МКС АТ 1125-а со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) – Ø 25 × 40 мм, а также встроенным счетчиком Гейгера–Мюллера. Предел основной погрешности измерения мощности дозы ± 15 %. Измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения проводились на высоте 1 м и 3–4 см от поверхности почвы в 10 точках. Плотность загрязнения территории составила 2960 ± 325 кБк/м².

Образцы лесных горючих материалов (далее – ЛГМ) включали образцы лесной подстилки (неразложившаяся и полуразложившаяся) и живого напочвенного покрова (мох, травянистая растительность). Горючие материалы наземной группы также включали сухие ветви диаметром не более 10 мм, а также сухие фрагменты коры и шишек.

Образцы лесной подстилки отбирались в 12 повторностях и разделялись на горизонты: А₀L (неразложившаяся) и А₀F + А₀H (полуразложившаяся). Образцы травянистой растительности, мелких ветвей и сухих шишек отбирались с учетных площадок с размером 1 м² в 5 повторностях.

Проведение эксперимента

Для анализа содержания радионуклидов в дымовых аэрозолях был проведен полунатурный огневой эксперимент. Условия эксперимента подробно описаны в [5]. Дымовые аэрозоли отбирались при помощи аспиратора ПУ-3Э в двух режимах: режим тления (разреженный дымовой поток) и режим горения (концентрированный дымовой поток). В ходе огневого эксперимента было проведено 5 серий опытов с отбором аэрозолей в 5 повторностях для каждой серии. Объемная активность аэрозолей рассчитывалась по формуле:

$$AV = A_i/V, \quad (1)$$

где AV — объемная активность аэрозолей, кБк/м³, A_i — активность i -го фильтра, Бк, V — объем прокачанного воздуха, м³.

Пробоподготовка и радиометрические измерения

Радиохимический анализ образцов включал предварительную пробоподготовку, переводение радионуклидов в раствор, радиохимическое выделение и очистку трансурановых элементов. На этапе предварительной подготовки проб происходило разложение органического вещества путем сжигания в муфельной печи при контролируемой температуре, которое состояло из трех последовательных этапов — высушивания, обугливания и озоления.

Последующие этапы анализа включали радиохимическую очистку и выделение изотопов плутония и америция, основанную на ионообменной хроматографии. При этом раствор пропускали через колонку с анионитом в азотнокислой форме для удаления мешающих макрокомпонентов и искусственных радионуклидов, а также урана, тория и продуктов их распада. При этих условиях плутоний сорбируется на

смоле, а катионы Am^{3+} попадают в фильтрат. Далее плутоний элюировали 0,01 моль/л раствором HF в 0,3 моль/л HNO_3 .

Очистку америция от железа и урана проводили путем перевода их в анионное состояние в солянокислой среде и поглощения образовавшихся анионных комплексов – FeCl_4^- и $\text{UO}_2\text{Cl}_4^{2-}$ анионитом. Очистку от катионов Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} и выделение америция осуществляли на катионите, проводя промывки растворами соляной кислоты разной концентрации. После сброса примесей америций элюировали с катионита 4 моль/л HCl. Тонкослойную мишень плутония и америция готовили соосаждением с микрограммовыми количествами гидроокиси церия или фторидом лантана.

Альфа-спектрометрические измерения проводились с использованием α -спектрометра «Alpha Analyst» (Canberra) с минимальной детектируемой активностью по ^{238}Pu , ^{239}Pu , $^{241}\text{Am} = 10^{-3}$ Бк/пробу и основной относительной погрешностью измерения не более 30 %. Эффективность детектирования составляла 25 %.

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 МэВ. 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. 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 И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных нами исследований был изучен структурный состав ЛГМ сосняков, расположенных в зоне радиоактивного загрязнения. В состав наземной группы горючих материалов входят основные проводники горения: лесная подстилка, состоящая из растительных остатков, и горючие материалы в напочвенном покрове, которые включают в свой состав травы и мхи, лишайники, опад, мелкие ветви. Сосновые фитоценозы имеют хорошо развитую лесную подстилку под пологом леса (3–6 см).

Анализ данных по распределению цезия-137 в элементах опада показал, что максимальный вклад в его радиоактивное загрязнение дает хвоя. Удельная активность данного компонента составила 47,3–51,3 % от общего загрязнения опада. Наименьший вклад характерен для шишек. В этой фракции запасено до 10 % от общего содержания радионуклида в опаде. Общее распределение ^{137}Cs по фракциям опада для средневозрастных сосновых насаждений в условиях местопроизрастания A_2 приведено на рис. 1. Плотность загрязнения опада на участке отбора составила $(18,6 \pm 2,1)$ кБк/м².

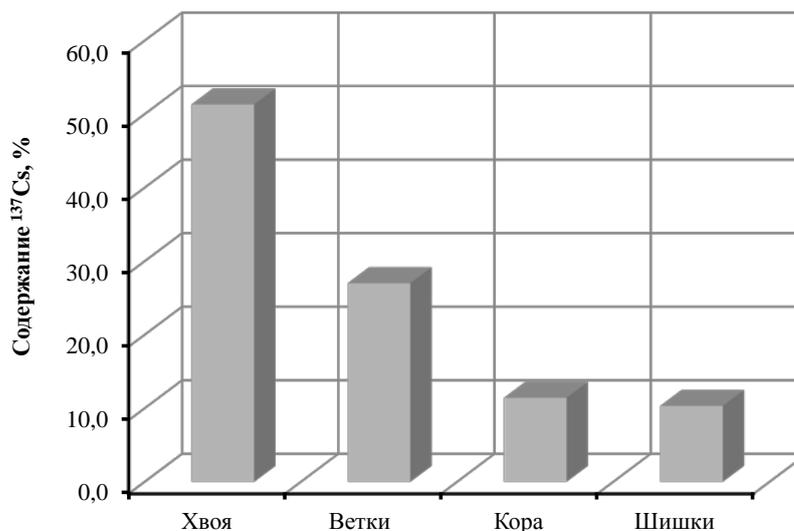


Рис. 1. Распределение ^{137}Cs по фракциям опада

Содержание долгоживущих радионуклидов в лесной подстилке

Фракционный состав лесной подстилки имеет важное значение при прогнозировании динамики плотности загрязнения ЛГМ. Определив долю каждого компонента в составе лесной подстилки и его удельную активность, можно оценивать загрязнение основных проводников горения радионуклидами и учитывать их влияние на формирование активности твердых и газообразных продуктов сгорания. Так, в ходе исследования нами было измерено содержание долгоживущих радионуклидов (^{137}Cs , ^{241}Am , ^{238}Pu , $^{239, 240}\text{Pu}$) в двух структурных фракциях лесной подстилки:

- A_0L (неразложившаяся подстилка), включающая в себя живой напочвенный покров, состоящий преимущественно из мхов (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt, *Dicranum polysetum* Sw., *Polytrichum commune* Hedw.) и лишайников (*Cladonia fimbriata* (L.) Fr. и *C. subrilata* (L.) Weber in Wigg), а также опад и мелкие ветви;
- A_0F+A_0H (ферментативно-гумусный слой), представляющий собой растительный материал различной степени разложения.

Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Содержание долгоживущих радионуклидов в различных фракциях лесной подстилки сосновых фитоценозов

Фракция лесной подстилки	Удельная активность			
	¹³⁷ Cs, кБк/кг	²⁴¹ Am, Бк/кг	^{239, 240} Pu, Бк/кг	²³⁸ Pu, Бк/кг
Неразложившаяся подстилка (A ₀ L)	50,8 ± 5,1	13,9 ± 0,9	5,1 ± 0,5	2,18 ± 0,3
Ферментативно-гумусный слой (A ₀ F+A ₀ H)	154,9 ± 13,2	480,7 ± 45,3	91,9 ± 8,2	38,7 ± 4,1

Сопоставляя полученные нами данные по содержанию ¹³⁷Cs в лесной подстилке с данными исследований предыдущих лет [6], мы установили, что период полуснижения плотности ее загрязнения составляет около 15 лет. В настоящее время в лесной подстилке находится около 23 % от общего запаса цезия-137 в сосновом фитоценозе. Практически с момента катастрофы на ЧАЭС в лесных биогеоценозах постоянно происходит процесс перераспределения радионуклидов между минеральной частью почвы и лесной подстилкой. В последние годы отмечается уменьшение доли запаса ¹³⁷Cs в последней.

Среди основных механизмов снижения плотности загрязнения лесной подстилки ¹³⁷Cs следует отметить радиоактивный распад, миграцию радионуклидов за пределы корнеобитаемого слоя, процесс «старения» радионуклидов вследствие их фиксации малоподвижными гуматами.

Радиационная опасность лесных пожаров

При лесных пожарах в зонах радиоактивного загрязнения наибольшую опасность для человека представляют аэрозольные продукты сгорания лесных горючих материалов. Ингаляционное поступление мелкодисперсной фракции аэрозолей может давать вклад в формирование дозы внутреннего облучения. Ресуспензия долгоживущих радионуклидов с дымовой эмиссией лесных пожаров может формировать вторичное загрязнение прилегающей территории.

Согласно существующим данным [7], ресуспензия долгоживущих радионуклидов происходит в двух формах: дымовых частицах и минеральной пыли. Частицы пыли обычно имеют размеры от 2 до 100 мкм и легко задерживаются респираторами. Аэрозольные частицы с размерами от 0,04 до 0,3 мкм ингаляционным путем попадают в легкие.

В ходе исследования нами были получены данные о содержании ¹³⁷Cs в дымовых аэрозолях при горении лесной подстилки с плотностью загрязнения свыше 1480 кБк/м². Объемная активность аэрозолей по цезию-137 составила (0,84 ± 0,04) Бк/м³ при разреженном дымовом потоке и (838 ± 134) Бк/м³ при максимальном задымлении. При горении лесной подстилки с плотностью загрязнения от 555 до 1480 кБк/м² объемная активность аэрозолей составила (0,169 ± 0,021) Бк/м³ при разреженном дымовом потоке и (74 ± 15) Бк/м³ при

максимальном задымлении. По данным мониторинга, проведенного летом 1992 года во время пожара в зоне отчуждения, концентрация радионуклидов в воздухе варьировала от 0,017 Бк/м³ до 1,5 Бк/м³. На рис. 2 представлены результаты сравнения данных о содержании ¹³⁷Cs в дымовых аэрозолях с фоновыми значениями. В качестве фона были выбраны значения содержания ¹³⁷Cs в воздухе на «чистых» территориях.

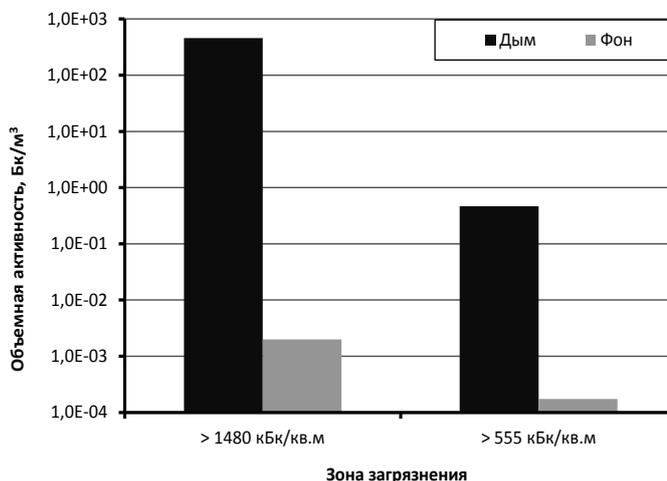


Рис. 2. Средние значения объемной активности ¹³⁷Cs в дымовых выбросах

Согласно данным нормативного акта ГН 2.6.1.8-127-2000 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000)», допустимая среднегодовая объемная активность для персонала и населения равны 1,7 кБк/м³ и 27 Бк/м³ соответственно. Принимая во внимание данные нормативы, следует отметить, что дымовые выбросы, образующиеся при сгорании ЛГМ с плотностью загрязнения свыше 1480 кБк/м², по содержанию цезия-137 могут превышать допустимые объемные активности для населения (ДОО_{нас}), а в отдельных случаях и допустимые объемные активности для лиц, участвующих в ликвидации пожара (ДОО_{пер}). При сгорании ЛГМ на территориях с плотностью загрязнения, равной 555 кБк/м², превышения допустимой среднегодовой объемной активности цезия-137 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 ДОО_{нас} и ДОО_{пер}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящее время в напочвенном покрове лесных фитоценозов, находящемся в 30-км зоне радиоактивного загрязнения, сконцентрировано большое количество долгоживущих радионуклидов. В случае

лесного пожара эти радионуклиды представляют потенциальную радиационную опасность, которая напрямую зависит от вида пожара, его интенсивности и площади.

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.

Список литературы

1. Будыка А.К. Специфика радиационной обстановки при лесных пожарах в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / А.К. Будыка, Б.И. Огородников // Сб. науч. тр. ин-та леса НАН Беларуси. – 2002. – Вып. 54. – С. 89–92.
2. Kashparov V.A. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of firefighters / V.A. Kashparov, S.M. Lundin, A.M. Kadygrib [et al.] // J. of Environ. Radioactivity 2000. – № 51. – P. 281–298.
3. Dusha-Gudym S.I. Transport of radioactive materials by wildland fires in the Chernobyl accident zone: how to address the problem / S.I. Dusha-Gudym. // International forest fire news. – 2005. – №32. – P. 119–125.
4. 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. Автор...дисс. на соиск. канд. биол. наук. / Кудряшов В.П. – 03.00.01., 03.00.16. Минск, 25 с.
5. Дворник А.А. Состояние дымовых аэрозолей при сгорании радиоактивных лесных горючих материалов в условиях лабораторного эксперимента / А.А. Дворник, Р.К. Спириков // Экологический вестник. Научно-практический журнал. – 2013. – № 2. – С. 5–10.
6. Schell W.R. Model-directed sampling in Chernobyl forests: general methodology and 1994 sampling program / W.R. Schell [et al.] // The science of the total environment. – 1996. – №3. – P. 229–240.
7. Zibtsev S.V. Fires in nuclear forests: silent threats to the environment and human security / S.V. Zibtsev, J.G. Goldammer, S. Robinson, O.A. Borsuk // Unasylva 243/244. – 2015. – Vol. 66. – P. 40–51.

LONG-LIVED RADIONUCLIDES IN THE FOREST LITTER OF PINE PHYTOCENOSIS AND THEIR POTENTIAL THREAT TO HUMANS DURING FOREST FIRES

Dvornik A.A., Korol R.A., Dvornik A.M.

*Institute of radiobiology NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus;
Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus
E-mail: aadvornik@gmail.com.*

The results of study of radiation threat of combustion products of pine phytocenoses, located in the areas with radioactive contamination are presents in the paper. The content of long-lived radionuclides in forest fuel materials is shown. It was found that the burning of litter and other plant materials with high levels of contamination can be a serious threat to a person near the center of burning.

The threat of forest fires revealed after numerous fires in the Chernobyl exclusion zone (CEZ) in 1992 on the border with Ukrainian part of exclusion zone. The large amount of wildfires in Belarus also have been registered in 1996, 1999 and 2002. Several studies have noted that during the forest fire in CEZ in May 1992 volume activity of ^{137}Cs in the air has increased by two orders of magnitude compared with normal values (about $3 \cdot 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$). During the forest fires in areas contaminated with radionuclides, the smoke particles are released in the air. The activity concentration of radionuclides deposited in these particles is able to exceed the allowable levels of radioactivity in the air. The emission containing radionuclides deposited on the fine aerosol fractions is particularly dangerous. ^{137}Cs and ^{90}Sr are especially dangerous and have relatively high dose coefficients for external exposure pathways. Inhalation of radionuclides (especially ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am) can generate additional internal doses both for firefighters, near the source of ignition, and for citizen, at a distance from the source. In addition, radionuclides released from the fire source may be transferred with the airflows over long distances, which can lead to a secondary radioactive contamination.

Keywords: forest fires, radionuclides, litter, radioactive aerosols, permitted volume activity.

References

1. Budyka A.K., Ogorodnikov B.I., Specificity of the radiation situation during forest fires in the Chernobyl exclusion zone, *Collection of sci. works of the Inst. of Forest of NAS of Belarus*, **54**, 89 (2002).
2. Kashparov V.A. [et al.], Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of firefighters, *J. of Environ. Radioactivity*, **51**, 281 (2000).
3. Dusha-Gudym S.I., Transport of radioactive materials by wildland fires in the Chernobyl accident zone: how to address the problem, *International forest fire news*, **32**, 119 (2005).
4. Dvornik A.A., Spirov R.K., Status of smoke aerosols during the combustion process of radioactive forest fuel under laboratory conditions, *Ecological bulletin*, **2(24)**, 5 (2013).
5. Kudryashov V.P., Abstract Ph.D. biol. sci. diss., Minsk: IRB, 25 (1998).
6. Schell W.R. Linkov, I., Rimkevich, V., Chistic, O., Lutsko, A., Dvornik, A.M., Zhuchenko, T.A. Model-directed sampling in Chernobyl forests: general methodology and 1994 sampling program, *Sci. Total Environ.*, **3**, 229 (1996).
7. Zibtsev S.V., Goldammer J.G., Robinson S., Borsuk O.A., Fires in nuclear forests: silent threats to the environment and human security, *Unasylva* 243/244, **66**, 40 (2015).

Поступила в редакцию 15.10.2015 г.