

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ

УДК 582:539.1.074.004.14:623.454.8“713”

ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

© 2008 г. С. И. Спиридонов*, С. В. Фесенко, С. А. Гераськин, В. М. Соломатин,
Е. И. Карпенко

Всероссийский НИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, Обнинск

Разработаны дозиметрические модели для оценки доз облучения древесных растений, произрастающих на загрязненной долгоживущими радионуклидами территории. Модели параметризованы с использованием данных, полученных на экспериментальных участках в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся радиоактивным выпадениям в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Выполнена оценка доз облучения генеративных органов сосны, находящихся на этих участках. Определен вклад различных источников и видов ионизирующего излучения в формирование дозовых нагрузок на указанные объекты.

Древесные растения, авария на Чернобыльской АЭС, радионуклиды, дозы облучения, математические модели.

Среди природных объектов наиболее уязвимыми по отношению к воздействию ионизирующего излучения являются лесные экосистемы вследствие высокой радиочувствительности древесных растений (особенно хвойных), их повышенной способности задерживать поступающие из атмосферы радионуклиды и медленно самоочищаться от них [1, 2].

При тяжелых радиационных авариях на Южном Урале в 1957 г. и Чернобыльской АЭС в 1986 г. именно лесные экосистемы пострадали в наибольшей степени. Так, после аварии на Чернобыльской АЭС площадь летального поражения сосновых лесов составила 500–600 га, сосновых насаждений с сильной и средней степенью повреждения соответственно 3000 и 12000 га [3]. На территории Восточно-Уральского радиоактивного следа к осени 1959 г. сосна полностью погибла на площади 2000 га [4].

Широкомасштабное радиоактивное загрязнение лесных экосистем приводит к значимым радиологическим последствиям для человека. К таким последствиям следует отнести накопление радионуклидов в лесной продукции, ограничивающее ее дальнейшее использование, внутреннее и внешнее облучение населения [5]. Доля лесной составляющей в формировании коллективной дозы облучения сельского населения в результате радиоактивного загрязнения лесов после аварии на Чернобыльской АЭС достигала в некоторых ситуациях 50% суммарной дозы от чернобыль-

ских выпадений [6]. На основе анализа радиационной обстановки в лесных экосистемах на территории Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС, обоснована необходимость и разработана стратегия защитных мероприятий, направленных на снижение доз облучения населения [7].

Несмотря на то, что в рейтинге проблем лесной радиэкологии первое место занимают вопросы, касающиеся прогнозирования радиологических последствий для человека, проблема оценки действия радиационного фактора на компоненты лесных экосистем требует своего решения. Это обусловлено большими размерами лесных территорий, подвергшихся радиоактивным выпадениям после аварии на Чернобыльской АЭС, а также высокой радиочувствительностью древесных растений. Важнейшим этапом оценки последствий радиоактивного загрязнения лесных экосистем является идентификация дозовых нагрузок на их компоненты [8].

Цель настоящей работы – разработка моделей для оценки доз облучения древесных растений, произрастающих в настоящее время на подвергшихся чернобыльским выпадениям территориях Российской Федерации, и сопоставление полученных оценок с пороговыми уровнями дозовых нагрузок для биоты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

К наиболее загрязненным после чернобыльской аварии территориям Российской Федерации относятся юго-западные районы Брянской обла-

*Адресат для корреспонденции: 249032 Обнинск, Калужская обл., ГНУ ВНИИСХРАЭ РАСХН; тел.: (08439) 7-44-20; факс: (08439) 6-80-66; e-mail: spiridonov.si@gmail.com.

Кроны древесных растений – зона 0
“Подкровный” слой – зона 1
Нижний ярус леса – зона 2
Лесная подстилка – зона 3
Почвенный слой, 0–5 см – зона 4
Почвенный слой, 5–10 см – зона 5
Почвенный слой, 10–15 см – зона 6
Почвенный слой, 15–20 см – зона 7

Рис. 1. Концептуальная схема модели, предназначенной для расчета дозовых нагрузок на генеративные органы деревьев сосны от γ -излучения ^{137}Cs .

сти. В составе “чернобыльских выпадений на территории Брянской области присутствовали радионуклиды с разными периодами полураспада. Так, в 1988 г. в компонентах лесных экосистем, расположенных на этой территории, обнаружены: ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{144}Ce и другие радионуклиды [9]. С течением времени происходило изменение радионуклидного состава загрязнения за счет распада короткоживущих нуклидов. В 1992 г. основной вклад в радиоактивное загрязнение лесных почв Брянской области вносили ^{137}Cs и ^{134}Cs (94 и 6% от суммарной плотности загрязнения, соответственно) [9]. Поскольку период полураспада ^{134}Cs составляет 2.06 года, за истекший период времени (с 1992 по 2007 г.) содержание этого радионуклида в почвах и других компонентах лесных экосистем уменьшилось в 7–8 раз. Таким образом, в настоящее время подавляющий вклад в формирование дозовых нагрузок на различные виды биоты, населяющие территорию Брянской области, вносит ^{137}Cs . Это обстоятельство было учтено при разработке моделей, предназначенных для расчета дозовых нагрузок на генеративные органы сосновых деревьев, произрастающих на экспериментальных участках.

Дозиметрическая модель для оценки дозы от γ -излучения. Для расчета дозовых нагрузок, формируемых γ -излучением ^{137}Cs , лесная экосистема была разделена на 8 зон по вертикальному профилю (рис. 1). Три верхние зоны представляют надземную часть фитоценоза, остальные характеризуют лесную подстилку и почвенные слои толщиной 5 см. При разработке концептуальной

схемы дозиметрической модели принято допущение о равномерном распределении радионуклидов в пределах каждой зоны.

Таким образом, каждая из представленных на рис. 1 зон рассматривалась в качестве бесконечного толстого источника (бесконечной “пластины”) с равномерным распределением активности. Объекты, для которых оценивались дозовые нагрузки, – генеративные органы деревьев сосны, сосредоточены в пределах самой верхней зоны, названной “кроны древесных растений”. Эта зона представляет собой совокупность двух толстых бесконечных источников излучения, один из которых расположен выше, а другой – ниже уровня, на котором проводили отбор генеративных органов деревьев сосны. При расчете мощности дозы, формируемой γ -излучением радионуклидов, распределенных в пределах зон “Кроны древесных растений”, “Подкороновый слой”, “Нижний ярус леса”, и зон, имитирующих слои системы подстилка-почва, использовали представление – “источник в виде толстой пластины за защитой” [10]. В этом случае в качестве защиты рассматривались слои, расположенные выше слоя-источника.

Формулы для расчета мощности дозы γ -излучения от источников в виде бесконечных пластин, расположенных за защитой, выведены в [11]. Для оценки мощности дозы от толстых бесконечных источников γ -излучения, имитирующих зоны, выделенные в пространстве лесной экосистемы, использовали подход, описанный в [12]. В рамках этого подхода учитывали многократное рассеяние излучения путем учета фактора накопления – кратности превышения характеристик поля нерассеянного и рассеянного излучения над характеристиками поля рассеянного излучения. При разработке модели использован фактор накопления в форме Тейлора [9]:

$$B(E_0, \mu d) = A \exp(-\alpha_1 \mu d) + (1 - A) \exp(-\alpha_2 \mu d), \quad (1)$$

где E_0 – энергия γ -квантов, μ – линейный коэффициент ослабления, d – толщина защиты, A , α_1 и α_2 – численные коэффициенты.

Формулы для расчета мощности дозы γ -излучения, формируемой источником, соответствующим i -й зоне ($i > 0$), имеют вид:

$$D_i^\gamma = \frac{2\pi\Gamma\rho_s q_v^i}{\rho_i \mu_s} \left\{ E_2^* \left[\frac{\mu_s}{\rho_s} \left(\rho_0 \Delta h_0 + \sum_{k=1}^{i-1} \rho_k h_k \right) \right] - E_2^* \left[\frac{\mu_s}{\rho_s} \left(\rho_0 \Delta h_0 + \sum_{k=1}^i \rho_k h_k \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$E_2^*(z) = \frac{A}{1 + \alpha_1} E_2[(1 + \alpha_1)z] + \frac{1 - A}{1 + \alpha_2} E_2[(1 + \alpha_2)z], \quad (3)$$

где Γ – γ -постоянная; q_v^i – концентрация радионуклидов в i -й зоне; ρ_i – плотность среды в i -й зоне; ρ_s – плотность воздуха; μ_s – линейный коэффициент ослабления γ -излучения в воздухе; h_k – толщина k -й зоны; Δh_0 – толщина слоя между уровнем, на котором проводили отбор генеративных органов деревьев сосны и верхней границей зоны 1; E_2 – функция Кинга.

При выводе уравнения (2) учитывали, что массовые коэффициенты ослабления γ -излучения ^{137}Cs в различных средах (v) имеют близкие значения. Так, отличия величин $v = \mu/\rho$ для воздуха и бетона при энергии γ -квантов ^{137}Cs (662 кэВ) не превышают 1% [10]. Выражение для расчета мощности дозы γ -излучения, формируемой источником, соответствующим зоне “Кроны древесных растений”, можно представить в виде:

$$D_0^\gamma = \frac{2\pi\Gamma\rho_s q_v^0}{\mu_s \rho_0} \left\{ 2 \left(\frac{A}{1 + \alpha_1} + \frac{1 - A}{1 + \alpha_2} \right) - E_2^* \left[\mu_s \frac{\rho_0}{\rho_s} (h_0 - \Delta h_0) \right] - E_2^* \left[\mu_s \frac{\rho_0}{\rho_s} \Delta h_0 \right] \right\}, \quad (4)$$

где q_v^0 – концентрация радионуклидов в зоне “Кроны древесных растений”; ρ_0 и h_0 – плотность среды и толщина этой зоны соответственно.

Дозиметрическая модель для оценки дозы от β -излучения. При расчете дозовых нагрузок, формируемых β -излучением, зону “Кроны древесных растений” рассматривали в качестве объемного источника с гомогенным распределением радионуклидов. Дозу внутри этого источника определяли как сумму поверхностных доз от двух блоков толщиной Δh_0 и $(h - \Delta h_0)$. Для определения дозы на поверхности каждого блока использовали описанный в [13] подход:

$$D_i^\beta = 0.5 D_\beta \left\{ c^2 \alpha \left[\frac{\nu \rho h_i}{c} \left(2 + \ln \frac{c}{\nu \rho h_i} \right) + \exp \left(1 - \frac{\nu \rho h_i}{c} \right) - 3 \right] + 1 - \alpha \exp(1 - \nu \rho h_i) \right\}, \quad (5)$$

где ν – эффективный коэффициент поглощения; ρ – плотность среды; h_i – толщина i -го блока; c – функция максимальной энергии β -спектра; α – параметр, зависящий от c ; D_β – доза внутри большого объема, заполненного радионуклидами с та-

кой же концентрацией, как и в рассматриваемом блоке.

$$D_\beta = k \bar{E}_\beta \tau, \quad (6)$$

где \bar{E}_β – средняя энергия спектра β -частиц, приходящаяся на 1 распад; τ – количество распадов в единице массы рассматриваемого объемного источника; k – численный коэффициент.

Определение параметров и входных переменных моделей. Параметризацию моделей выполняли для сосновых насаждений юго-западных районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В 2003 г. было выбрано 4 экспериментальных участка, одинаковых по почвенно-климатическим условиям, но контрастных по уровню радиоактивного загрязнения. Участки расположены на расстоянии 2–7 км от поселка ВИУА и населенных пунктов Старые Бобовичи и Заборье. Почва на всех экспериментальных участках – дерново-подзолистая супесчаная. Мощность экспозиционной дозы (МЭД) на участках менялась в пределах 3.6–25.2 пА/кг (50–350 мкР/ч). Контрольный участок расположен в Выгоничском районе Брянской области (МЭД 0.43–0.94 пА/кг (6–13 мкР/ч). На выбранных участках методом конверта отбирали по пять проб почвы, из которых формировали объединенную пробу. В целях получения информации для параметризации дозиметрической модели пробы почвы отбирали отдельно по слоям толщиной 5 см.

Значения параметров, характеризующих плотности вещества в каждой из выделенных зон (рис. 1), высота деревьев и другие биометрические характеристики надземной части фитоценоза, определенные на основе экспериментальных исследований с привлечением литературных данных [14–16], приведены в табл. 1.

Значения концентраций ^{137}Cs в слоях почвы (Q_i^v), полученные в ходе экспериментальных работ (табл. 2), представляют собой входные переменные для почвенного блока модели. Стандартные отклонения от средних значений экспериментально определенных показателей во всех случаях не превышают 12%. Оценка значений переменных, характеризующих распределение ^{137}Cs в компонентах фитоценоза (q_0^v , q_1^v , q_2^v), проведена на основе литературных данных [5, 17, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проверка адекватности модели. Для проверки адекватности модели проведено сравнение расчетных значений дозовых нагрузок, формируемых γ -излучением, на генеративные органы деревьев сосны и экспериментальных показателей –

Таблица 1. Значения параметров моделей

Параметры		Экспериментальные участки				
обозначение	размерность	контроль	Бобович	ВИУФ	Заборье-1	Заборье-2
ρ_0	кг/м ³	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
ρ_1		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ρ_2		1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
ρ_3		640	210	150	300	160
ρ_4		970	960	1150	1080	1000
ρ_5		1090	1080	1140	1190	1120
ρ_6		980	1150	1230	1100	1180
ρ_7		–	1180	1240	1210	1180
h_{tree}	м	10	5	10	5	5
h_1		3	1.6	3	1.6	1.6
h_2		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
h_3		0.04	0.02	0.01	0.01	0.01
h_4		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
h_5		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
h_6		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
h_7		–	0.05	0.05	0.05	0.05
Δh_0		3.5	2.5	3.5	2.5	2.5

Таблица 2. Значения входных переменных моделей

Входные переменные		Экспериментальные участки				
обозначение	размерность	контроль	бобовичи	ВИУА	Заборье-1	Заборье-2
q_0^v	Бк/м ³	34.9	4130	1970	7540	10230
q_1^v		26.0	3070	1460	5610	7620
q_2^v		32.0	3780	1800	6910	9310
Q_3^v	Бк/кг	91.7	10000	6290	16010	7650
Q_4^v		60.4	17200	6400	17600	43800
Q_5^v		44.0	877	951	10100	1870
Q_6^v		8.2	280	189	1590	396
Q_7^v		–	233	119	674	180

плотности загрязнения почвы ^{137}Cs и мощности экспозиционной дозы, измеренной на расстоянии 1 м от поверхности почвы. Отношения мощностей поглощенных и экспозиционных доз, представленные в табл. 3, практически одинаковы для всех экспериментальных участков. Сходные значения для участков “Бобовичи”, “ВИУФ”, “Заборье-1” и “Заборье-2” получены и в результате

расчетов отношений мощности поглощенной дозы к плотности загрязнения. Некоторая вариация рассматриваемых показателей обусловлена различием распределения ^{137}Cs по профилю лесных экосистем. На основе результатов сравнения расчетных и экспериментальных показателей можно сделать вывод о том, что дозиметрическая модель, параметризованная для сосновых насаждений

Таблица 3. Сравнение расчетных и экспериментальных показателей

Участок	Плотность загрязнения ^{137}Cs , кБк/м ²	Мощность экспозиционной дозы, пА/кг	Мощность поглощенной дозы γ -излучения, мГр/год	Отношение мощности поглощенной дозы к мощности экспозиционной дозы, (мГр/год)/(пА/кг)	Отношение мощности поглощенной дозы к плотности загрязнения, (мГр/год)/(кБк/м ²)
Бобовичи	946	8.64	13.7	1.59	0.0145
ВИУА	451	4.32	6.7	1.55	0.015
Заборье-1	1730	15.1	25.5	1.69	0.0147
Заборье-2	2340	20.9	33.9	1.62	0.0145

Таблица 4. Мощности доз облучения генеративных органов сосновых деревьев от разных источников γ -излучения, мкГр/сут

D_i^γ	Контроль	Бобовичи	ВИУА	Заборье-1	Заборье-2
D_0	0.011	0.81	0.64	1.48	2.0
D_1	0.00076	0.17	0.16	0.32	0.43
D_2	1.4×10^{-5}	0.01	0.01	0.02	0.03
D_3	0.088	1.51	0.34	1.72	0.44
D_4	0.12	32.1	14.3	36.8	84.4
D_5	0.098	1.93	2.21	24.5	4.27
D_6	0.016	0.65	0.46	3.5	0.94
D_7	–	0.52	0.28	1.54	0.4
D_{sum}	0.333	37.7	18.3	69.8	92.9

Брянской обл., позволяет адекватно оценивать дозовые нагрузки на компоненты надземной фитомассы леса.

Для подтверждения этого вывода проведено сравнение полученных значений мощностей поглощенных доз (для плотности загрязнения ^{137}Cs 1 МБк/м²) с результатами оценки мощности дозы, формируемой γ -излучением ^{137}Cs на расстоянии 1 м от поверхности лесной подстилки [19]. Результаты анализа показали, что расчетные мощности доз, находящиеся в диапазоне 1650–1690 (нГр/ч)/МБк/м², сопоставимы по своим значениям с мощностью дозы, оцененной В. Голиковым с соавторами (1750 (нГр/ч)/(МБк/м²)) [19]. Небольшое различие сравниваемых значений можно объяснить тем, что в последнем случае дозы рассчитывались для объекта, находящегося на более близком расстоянии от поверхности почвы.

Мощности доз γ -излучения ^{137}Cs , формируемых разными источниками (рис. 1), представлены в табл. 4. Максимальная дозовая нагрузка на генеративные органы сосновых деревьев отмечена на экспериментальном участке “Заборье-2” – 33.9 мГр/год (92.9 мкГр/сут). Минимальная дозовая нагрузка зафиксирована на участке “ВИУА” – 6.7 мГр/год (18.3 мкГр/сут).

Результаты расчета формируемых β - и γ -излучением ^{137}Cs годовых доз, а также суммарных мощностей доз приведены в табл. 5. Максимальная дозовая нагрузка от β -излучения на генеративные органы деревьев сосны отмечена на экспериментальном участке “Заборье-2”. На этом же участке зафиксирована и наибольшая суммарная мощность дозы – 37.8 мГр/год.

Оценка вклада γ - и β -излучений в формирование дозовых нагрузок на генеративные органы сосновых деревьев, произрастающих на разных экспериментальных участках, показала, что во

Таблица 5. Годовые дозы облучения генеративных органов сосновых деревьев формируемые β -, γ -излучением и суммарные дозы, мГр

Экспериментальный участок	D_β	D_γ	D_{sum}
Контроль	0.010	0.122	0.132
Бобовичи	1.56	13.7	15.3
ВИУА	0.74	6.7	7.4
Заборье-1	2.84	25.5	28.3
Заборье-2	3.86	33.9	37.8

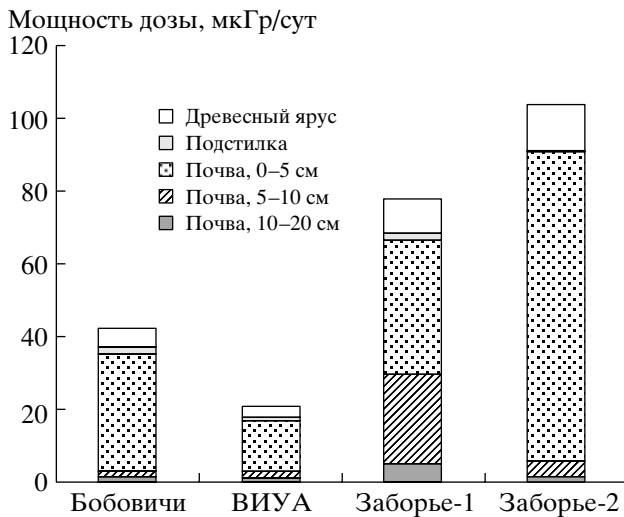


Рис. 2. Вклад различных зон, выделенных в лесных экосистемах, в формирование суммарных дозовых нагрузок на генеративные органы деревьев сосны.

всех случаях вклад β -излучения в суммарную мощность дозы не превышает 10%.

Результаты оценки вклада различных источников излучения, соответствующих зонам, выделенным в лесных экосистемах, в суммарную дозу облучения, показаны на рис. 2. Анализ представленной информации позволяет сделать вывод, что наиболее значимыми, с точки зрения облучения рассматриваемых объектов, являются зоны “Почвенный слой 0–5 см” и “Почвенный слой 5–10 см”. Поскольку средняя концентрация ^{137}Cs в кронах древесных растений значительно ниже концентрации этого радионуклида в почве, величина дозовой нагрузки на кроны от источника, соответствующего зоне 0, меньше, чем от источников, представляющих верхние почвенные слои. При этом поглощенная доза от радионуклидов, находящихся в пологе леса, формируется в основном за счет β -излучения.

Оцененные нами дозовые нагрузки на древесные растения даже на участке с наибольшим уровнем радиоактивного загрязнения (Заборье-2) не превышают 0.1 мГр/сут, что на 2 порядка ниже предложенной МКРЗ в качестве безопасной для наземных растений мощности дозы 10 мГр/сут [20]. В то же время анализ закономерностей формирования биологических эффектов в зоне, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС, свидетельствует о том, что мощности доз порядка 0.1 мГр/сут способны индуцировать достоверное увеличение генетических эффектов у наиболее чувствительных представителей флоры и фауны [21]. С этой точки зрения, хвойные древесные растения являются уникальным объектом в силу их высокой радиочувствительности. Действи-

тельно, проведенные нами экспериментальные исследования показали [22], что частота цитогенетических нарушений в корневой меристеме проростков семян сосны с наиболее загрязненным участком (Заборье-1 и Заборье-2) превышает контрольный уровень в 2 раза. Для обоснования радиационной природы выявленных эффектов требуются более детальные оценки доз облучения генеративных органов древесных растений.

Следует отметить, что при разработке представленных в работе моделей было принято допущение о гомогенном распределении радионуклидов в пределах всех зон, выделенных в лесной экосистеме, в том числе и в зоне 0. Представляется целесообразным выполнить расчет дозовых нагрузок на генеративные органы сосновых деревьев на основе данных, отражающих гетерогенное распределение β -излучающих радионуклидов в пологе древесных растений. Важным элементом таких исследований является экспериментальное определение концентрации радионуклидов в самих генеративных органах. При наличии такой информации возможна оценка доз облучения с учетом геометрии рассматриваемых объектов.

Работа частично поддержана проектом МНТЦ № 3003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергия и биосфера. М.: Энергоиздат, 1982. 215 с.
2. *Тихомиров Ф.А.* Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М.: Атомиздат, 1972. 174 с.
3. *Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений. СПб.: Наука, 1994. 255 с.
4. *Лазуков М.И., Чупрунов В.С.* // Вопросы лесной радиоэкологии / Под ред. А.И. Чилимова. М., 2000. С. 101–119.
5. *Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 1997. Т. 37. Вып. 4. С. 664–672.
6. *Fesenko S.V., Voigt G., Spiridonov S.I., Sanzharova N.I. et al.* // Radiat. Environ. Biophys. 2000. V. 39. P. 291–300.
7. *Спиридонов С.И., Фесенко С.В., Гонтаренко И.А.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 1. С. 104–112.
8. *Алексахин Р.М., Болтнева Л.И., Назаров И.М.* // Лесоведение. 1972. № 1. С. 35–43.
9. *Щеглов А.И.* Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах центральных районов Восточно-Европейской равнины: Дис. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ, 1997. 444 с.
10. *Машикович В.П.* Защита от ионизирующего излучения. М.: Энергоатомиздат, 1982. 296 с.
11. *Гусев Н.Г., Машикович В.П., Суворов А.П.* Физические основы защиты от излучений. Т. 1. М.: Атомиздат, 1980. 461 с.

12. *Фесенко С.В.* Действие радиационного фактора на экосистему пресноводного водоема: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ, 1985. 190 с.
13. Радиационная дозиметрия / Под ред. Дж. Хайна, Г. Браунелла. М.: Изд-во иностр. лит-ры. 1958.
14. *Анучин Н.П.* Лесная таксация. М.: Лесная пром-ть, 1982. 552 с.
15. *Атанайтис В.В.* // Лесное хозяйство. 1971. № 2. С. 49–52.
16. *Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г.* Справочник таксатора: Таблицы для таксации леса. М.: Лесная пром-ть, 1965. 459 с.
17. *Щеглов А.И., Тихомиров Ф.А., Цветнова О.Б. и др.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. Т. 36. Вып. 4. С. 469–477.
18. *Mamikhin S.V., Tikhomirov F.A., Shcheglov A.I.* // Sci. Total Environ. 1997. V. 193. P. 169–177.
19. *Golikov V., Barkovskii A., Kulikov V. et al.* Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forests / Eds. I. Linkov, W.R. Schell. Contaminated Forests. NATO Science Series, 2 Environmental Security. 1998. V. 58. P. 63–70.
20. Публикация 91 МКРЗ. Основные принципы оценки воздействия ионизирующих излучений на живые организмы, за исключением человека / Ред. Я. Валентин. М.: Комтехпринт, 2004. 76 с.
21. *Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Alexakhin R.M.* // Environ. Int. 2008. V. 34. № 5, in press.
22. *Geras'kin S.A., Oudalova A.A., Dilarev V.G. et al.* Effects of multipollutant exposures on plant populations / Eds. C. Mothersill, I. Mosse, C. Seymour. Multiple stressors: A challenge for the future. NATO Science Series. Springer, 2007. P. 73–89.

Поступила в редакцию
10.01.2008 г.

The Dose Estimation of Woody Plants in the Long-Term after the Chernobyl NPP Accident

S. I. Spiridonov, S. V. Fesenko, S. A. Geras'kin, V. M. Solomatin, Ye. I. Karpenko

*Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Obninsk, 249032 Russia;
e-mail: spiridonov.si@gmail.com*

Dosimetric models have been developed to estimate the exposure doses of woody plants growing in the area contaminated by long-lived radionuclides. The models are parameterized based on the data obtained from the experimental plots in the south-west districts of the Bryansk region affected by radioactive fallout of the Chernobyl NPP accident. Doses are estimated to generative organs of pine trees from these plots. The contribution from various sources and types of ionizing radiation to the absorbed dose formation for these objects is determined.