

Применение различных методов оценки мощности дозы внешнего облучения в лесных биогеоценозах

На основе экспериментальных данных о распределении ^{134}Cs и ^{137}Cs в вертикальном профиле лесных почв выполнены ретроспективные расчеты мощности дозы внешнего облучения сосны с применением инженерных методов для бесконечно протяженных источников конечной толщины и коэффициентов дозового преобразования, рекомендованных МКРЗ. Диапазон рассчитанной мощности дозы внешнего облучения с применением инженерных методов удовлетворительно согласуется с результатами измерений, выполненных с помощью дозиметра γ -излучения. При этом до 95% мощности дозы облучения формируется за счет излучения радионуклидов, находящихся в лесной подстилке и верхнем 2-см слое минеральной части почвы. Дозы облучения, рассчитанные инженерными методами и измеренные дозиметром, в 2–3 раза больше по сравнению с оцененными на основе КДП для объемного источника излучения.

Ключевые слова:

радионуклиды, распределение, вертикальный профиль почвы, доза внешнего облучения, сосна, лесные биогеоценозы.

Т.В.Переволоцкая,

А.Н.Переволоцкий

НИЦ «Курчатовский институт» ВНИИРАЭ,
г. Обнинск

Одной из задач проведения радиоэкологического мониторинга является оценка радиационного воздействия на биоту в зоне распространения радиоактивных выбросов объектов использования атомной энергии. В ряде научных публикаций [1,2] и рекомендациях МКРЗ [3] приведена методика расчетов доз облучения представительных организмов с применением радионуклид- и организм-специфичных коэффициентов дозового преобразования (КДП), полученных на основе имитации переноса излучения в различных средах методом Монте-Карло. Достоинствами применения КДП является простота расчета дозы, учет физико-химических свойств сред распространения и поглощения

излучения, а также взаимодействия переносчиков излучения с многослойными средами. К недостаткам можно отнести сложность расчета самих КДП, привязку к физическим характеристикам источника и приемника излучения при условии квазиравновесного распределения радионуклидов в системе «окружающая среда – организм».

Альтернативой применению КДП являются инженерные методы расчета дозы, основанные на интегрировании дозовой функции точечного источника излучения или численном решении уравнений переноса излучения [4–7]. Они более гибки к изменению параметров среды распространения и поглощения излучения, позволяют оценить дозы внешнего излучения в окружающей среде, и, на их основе, облучения представительных организмов в острую фазу после аварии, однако обладают большей погрешностью при описании распространения излучения в многослойных средах. Вместе с тем, для одинаковых геометрий источника и приемника излучения применение КДП и инженерных методов позволяют получить сопоставимые результаты расчетов дозы облучения для животных [7] и травостоя [8], однако эти оценки не подкреплены измерениями дозы в условиях реального радиоактивного загрязнения.

Оценка доз внешнего облучения одного из представительных организмов флоры (сосны) в аварийный период рекомендуется проводить с помощью КДП для плоского источника излучения с массовой толщиной $0,5 \text{ г/см}^2$, а в поставарийный период или при постоянных выпадениях – для объемного, с массовой толщиной 12 г/см^2 и равномерно распределенной активностью [3]. Однако в лесных насаждениях экспериментально установленное распределение радионуклидов в вертикальном профиле почвы носит экспоненциальный характер с преобладанием в лесной подстилке и верхних почвенных слоях минеральной части почвы [9,10], отличаясь от предложенных модельных представлений при оценке внешнего облучения биоты, рекомендованных МКРЗ [1-3]. В связи с этим представлялось актуальным сравнение результатов ретроспективных расчетов мощности дозы внешнего облучения с применением различных расчетных моделей с измеренными величинами в одних и тех же лесных насаждениях. Информационной основой для расчетов явились результаты экспериментальных исследований распределения ^{137}Cs и ^{134}Cs в вертикальном профиле почвы и измерений мощности дозы в лесных насаждениях белорусского сектора 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС, выполненные в 1991 г. [10].

Таким образом, цель настоящей работы – сравнение результатов расчетных и измерительных методов оценки дозы внешнего облучения представительного организма (сосны обыкновенной) в лесных насаждениях белорусского сектора 30-км зоны вокруг ЧАЭС.

Материалы и методика

Объектами исследований послужили сосновые насаждения искусственного происхождения 20-летнего возраста на момент проведения исследовательских работ, произрастающие в белорусском секторе 30-км зоны вокруг ЧАЭС (табл.1). В составе исследуемых насаждений преобладала сосна обыкновенная (> 90%) с примесью березы бородавчатой (< 10%). С 1987 г. в них проводили исследования динамики мощности дозы и распределения радионуклидов в вертикальном профиле почвы и элементах фитомассы [10]. Измерения мощности экспозиционной дозы внешнего γ -излучения проводили дозиметром ДРГ-01Т и переводили в единицы мощности поглощенной дозы, из которой вычитали естественный радиационный фон, равный 16 пГр/с , характерный для исследованных лесорастительных условий (табл.4 в [11]).

Табл.1. Радиационная обстановка на объектах исследований при их создании в 1987 г. [10].

Объект	Географические координаты	Мощность экспозиционной дозы на высоте 1 м, мкР/час	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²		
			¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	⁹⁰ Sr
Гн	29°48'25,96" в.д. 51°38'58,09" с.ш.	310±25	481±39	250±17	85±8
Пг	29°52'32,34" в.д. 51°37'41,72" с.ш.	1310±98	2590±205	1398±101	235±19
Кр	30°13'36,48" в.д. 51°33'16,88" с.ш.	3960±312	13875±1110	7215±562	380±27

Примечание: при закладке опытных объектов измерения мощности экспозиционной дозы внешнего γ -излучения выполнены дозиметром ДРГ-01Т.

Исходными данными для расчета дозы внешнего облучения от γ -излучения радионуклидов с применением КДП и инженерных методов послужили удельные активности ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs в вертикальном профиле почвы на опытных объектах [11] (табл.2).

Расчеты мощности дозы на основе КДП выполнены для геометрии плоского источника с массовой толщиной 0,5 г/см² и объемного – с массовой толщиной 12 г/см² согласно [3], при этом рассчитываемая величина равна произведению КДП на активность радионуклида в почве.

Расчеты мощности дозы внешнего облучения сосны инженерными методами основаны на интегрировании дозовой функции точечного источника излучения с учетом фактора накопления рассеянного излучения [6,7] и численного решения уравнений переноса излучения [5].

В соответствии с модельными представлениями предполагали распространение излучения от радионуклидов, равномерно распределенных в бесконечно протяженных в продольном направлении слоях конечной толщины – лесной подстилки и односантиметровых слоев минеральной части почвы (табл.2). Детектор излучения расположен на высоте 1 м над поверхностью почвы в однородной воздушно-растительной среде, состоящей из древесных стволов и воздуха, заполняющего промежутки между ними с плотностью 1,75 кг/м³ [6]. Предполагали, что эта высота является репрезентативной для всей подкрановой части древесного ствола сосны, а доза облучения сосны эквивалентна рассчитанной мощности дозы [3]. При этом роль защиты выполняет воздушно-растительная среда, а при рассмотрении облучения от слоев минеральной части почвы – вышележащие почвенные слои.

Расчет мощности дозы с аппроксимацией фактора накопления рассеянного излучения функцией Тейлора [6]:

$$P_i = 2\pi \cdot \Gamma \cdot \rho_a \cdot SA^i \cdot [E_2^*(z_1) - E_2^*(z_2)] / \mu_a, \quad (1)$$

где Γ – γ -постоянная радионуклида, Гр·м²/(Бк·с); SA^i – удельная активность в почвенном слое, Бк/кг; μ_a – линейный коэффициент ослабления γ -излучения в воздухе, 1/м [12]; ρ_a – плотность воздуха при стандартных условиях, кг/м³; $E_2^*(z)$ – модифицированная интегрально-показательная функция второго рода [6]; z_1 и z_2 – параметры модифицированной интегрально-показательной функции согласно [6]. Параметры z_1 и z_2 рассчитывали по формулам [6]:

$$z_1 = \mu \cdot h_m + \sum_{j=1}^n (\mu_s \cdot l_{j-1}), \quad (2)$$

$$z_2 = \mu \cdot h_m + \sum_{j=1}^n (\mu_s \cdot l_j), \quad (3)$$

где μ , μ_s – массовый коэффициент ослабления γ -излучения в воздухе и почве, соответственно, м²/кг [12]; h_m – высота измерения над поверхностью почвы, принята 1 м; l_j – линейная

Табл.2. Распределение удельной активности радионуклидов в почве в 1991 году и расчетная мощность дозы внешнего облучения сосны от излучения радионуклидов в различных почвенных слоях.

Почвенные слои	Удельная активность, кБк/кг [11]		Доза внешнего облучения сосны обыкновенной, пГр/с					
			от излучения ¹³⁷ Cs			от излучения ¹³⁴ Cs		
	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	(1)	(4)	(5)	(1)	(4)	(5)
Гн								
ЛП	107	10,4	145	131	162	38,5	32,9	41,4
0-1	18,5	1,77	69,6	50,9	73,2	19,5	15,9	19,5
1-2	2,80	0,40	10,8	9,24	10,2	4,62	3,60	4,69
2-3	1,46	0,20	5,34	4,48	4,52	2,22	1,76	1,73
3-4	0,67	0,11	2,32	1,95	1,89	1,18	0,87	0,87
4-5	0,31	0,06	1,00	0,82	0,75	0,62	0,45	0,42
5-6	0,28	0,04	0,87	0,71	0,60	0,39	0,28	0,26
6-7	0,19	0,02	0,51	0,42	0,39	0,22	0,15	0,13
7-8	0,14	0,02	0,31	0,28	0,26	0,15	0,10	0,10
8-9	0,08	-	0,18	0,15	0,14	-	-	-
9-10	0,03	-	0,07	0,05	0,05	-	-	-
Сумма	-	-	236	210	254	67,4	56,0	69,1
Пг								
ЛП	432	44,0	586	531	645	169	145	182
0-1	74,4	7,54	279	244	294	81,2	66,2	81,4
1-2	17,8	1,72	69,7	59,4	67,2	19,6	15,3	17,8
2-3	7,22	0,84	26,4	22,2	22,4	9,33	7,24	7,28
3-4	3,99	0,46	13,8	11,4	11,2	4,94	3,63	3,45
4-5	2,33	0,25	7,57	6,82	6,22	3,25	1,87	1,69
5-6	1,07	0,16	3,27	2,71	2,58	1,64	1,36	1,07
6-7	0,63	0,09	1,74	1,42	1,31	0,89	0,62	0,57
7-8	0,52	0,07	1,30	1,06	1,14	0,64	0,44	0,41
8-9	0,35	0,04	0,79	0,64	0,61	0,33	0,22	0,21
9-10	0,22	0,02	0,43	0,35	0,34	0,18	0,12	0,12
Сумма	-	-	990	881	1061	291	242	296
Кр								
ЛП	2064	223	2800	2540	3130	886	758	952
0-1	345	38,7	1290	1130	1360	422	344	423
1-2	105	8,81	412	351	397	402	79,2	92,0
2-3	56,9	4,30	208	175	176	47,8	36,0	37,3
3-4	34,5	2,38	119	98,5	96,6	25,8	19,0	19,2
4-5	19,4	1,30	63,0	51,7	47,6	13,5	9,60	9,14
5-6	12,9	0,84	41,2	32,7	29,9	8,60	6,07	5,64
6-7	6,85	0,48	19,0	15,5	14,3	4,54	3,10	2,93
7-8	5,10	0,37	12,8	10,4	9,69	3,11	2,25	2,10
8-9	2,44	0,21	5,61	4,46	4,26	1,74	1,18	1,11
9-10	1,71	0,12	3,39	2,74	2,65	0,91	0,60	0,58
Сумма	-	-	4974	4412	5268	1516	1259	1545

Примечание: ЛП – лесная подстилка. (1), (4), (5) – формулы, по которым выполнены расчеты.

толщина почвенного слоя (принята 0,02 м для лесной подстилки и по 0,01 м для почвенных слоев минеральной части почвы).

Расчет мощности дозы с аппроксимацией фактора накопления рассеянного излучения функцией Бергера выполнен согласно [7]:

$$P_i = 2\pi \cdot \Gamma \cdot \rho_i \cdot SA^i \cdot \left\{ e^{-z_1} - z_1 \cdot E_1(z_1) - e^{-z_2} + z_2 \cdot E_1(z_2) + \frac{a}{(1-b)^2} \left[e^{-(1-b)z_1} - e^{-(1-b)z_2} \right] \right\} / \mu, \quad (4)$$

где ρ_i – плотность i -го почвенного слоя, кг/м³; $E_1(z)$ – интегрально-показательная функция первого рода [7]; a и b – параметры функции Бергера [12].

Расчет мощности дозы на основе численного решения уравнений переноса излучения [5]:

$$P_i = 1 \cdot 10^{-15} \cdot SA^i \cdot \left\{ \frac{a_1}{a_3} \cdot e^{(a_4 - a_2)} \cdot e^{-a_3 \cdot e^{(-a_4 \cdot \rho_{lr})} \cdot l_{i-1}} \cdot \left[1 - e^{-a_3 \cdot e^{(-a_4 \cdot \rho_{lr})} \cdot (l_i - l_{i-1})} \right] + \frac{a_5}{a_6} \cdot e^{-a_6 \cdot l_{i-1}} \cdot \left[1 - e^{-a_6 \cdot (l_i - l_{i-1})} \right] \right\}, \quad (5)$$

где ρ_{lr} – плотность воздушно-растительной среды подкоронового пространства, принята 1,75 кг/м⁻³; $a_1 - a_6$ – радионуклид-специфичные параметры [5].

Результаты и обсуждение

Удельная активность ¹³⁷Cs в лесной подстилке опытных объектов достигала, кБк/кг: 107 на объекте Гн, 432 – Пг и 2064 – Кр (табл.2). В минеральной части почвы на глубине 4 см концентрация снижалась на один математический порядок и на глубине 9 см – на два порядка. Удельная активность ¹³⁴Cs в одних и тех же почвенных слоях была в 8–10 раз меньше по сравнению с ¹³⁷Cs, что было обусловлено меньшим осаждением первого радиоизотопа и снижением его активности за счет радиоактивного распада к моменту исследований. Такой характер распределения радионуклидов в вертикальном профиле почвы в наибольшей степени соответствует экспоненциальному.

Суммарная мощность дозы внешнего γ -облучения на высоте 1 м над поверхностью почвы от γ -излучения ¹³⁷Cs, содержащегося в почве, достигала, пГр/с: 5270 на объекте Кр, 1060 на Пг и 250 на Гн, ¹³⁴Cs была в 3–4 раза ниже (табл.2).

Вклад излучения радионуклидов, находящихся в лесной подстилке и минеральной части почвы в формирование суммарной мощности дозы внешнего γ -облучения был не одинаков и определялся не только концентрацией в них ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs, но и плотностью слоев. Так, удельная активность ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs в лесной подстилке была в 5–6 раз больше по сравнению с таковой для 0–1 слоя минеральной части почвы, однако плотность первой примерно в 4 раза меньше. Соответственно, лесная подстилка содержала 55–60% активности радионуклидов в исследованной части почвенного профиля, а 0–1 слой – около 25%. Указанными различиями в активности и объясняется 2–3-кратное превышение мощности дозы от излучения радионуклидов, находящихся в лесной подстилке по сравнению с верхним слоем минеральной части почвы. Для 0–1, 1–2 и 2–3 см почвенных слоев различия в мощности дозы внешнего γ -облучения на высоте 1 м обусловлены только различиями в содержании в них радионуклидов, поскольку их плотность сопоставима между собой.

Примерно 60% суммарной мощности дозы определялось γ -излучением ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs, находящихся в лесной подстилке. Вклад в мощность дозы излучения радионуклидов, которые содержатся в верхнем 0–1 см слое минеральной части почвы, не превышал 30%, а в 1–2 см – 5–8%. Таким образом, γ -излучение ¹³⁷Cs и ¹³⁴Cs, которые находятся в лесной подстилке и верхнем двухсантиметровом слое минеральной части почвы, могут формировать до 95% дозы внешнего облучения. Вклад в суммарную мощность дозы излучения радионуклидов, находящихся на глубине более 5 см, составляет менее 1%. Вместе с тем, вкладом глубинных почвенных слоев в мощность дозы пренебрегать нельзя при равномерном распределении радионуклидов в вертикальном профиле почвы, свойственном для агроценозов, и в условиях высокой интенсивности миграции радионуклидов, например, на почвах с гидроморфным режимом увлажнения [9].

Результаты расчетов суммарной мощности дозы внешнего γ -облучения на высоте 1 м на основе инженерных методов сопоставимы между собой и не отличаются более чем на 20%.

Вместе с тем, результаты для отдельных почвенных слоев несколько отличаются при применении различных формул. Так, мощность дозы от излучения радионуклидов в лесной подстилке на 20% больше при расчете согласно (5) по сравнению с (4). Это может быть связано с тем, что численное решение уравнений переноса излучения найдено для почвенных слоев со свойственной им плотностью (1,2–1,6 г/см³), в то время как плотность лесной подстилки в 4–5 раз меньше. С увеличением плотности почвенных слоев результаты расчетов мощности дозы практически одинаковы для (4) и (5), однако на 15–20% выше при аппроксимации рассеянного излучения функцией Тейлора (1).

В табл.3 приведена суммарная мощность дозы внешнего облучения на высоте 1 м над поверхностью почвы, рассчитанная инженерными методами и на основе КДП, а также измеренная с помощью дозиметра. Из представленных данных можно сделать вывод, что рассчитанная с помощью инженерных методов мощность дозы соответствует диапазону измеренных значений. Например, для объекта Гн этот диапазон составляет 0,23–0,28 нГр/с, а рассчитанная – 0,27–0,32 нГр/с, и аналогичная ситуация прослеживается по другим объектам. Таким образом, можно констатировать, что инженерные методы достаточно адекватно описывают формирование внешнего облучения при исследованном распределении радионуклидов в почве, что и подтверждается результатами измерений.

Табл.3. Суммарная мощность дозы внешнего облучения сосны различными методами, нГр/с.

Объект	Расчетные					Измерительные	
	Инженерные методы			На основе КДП для источников излучения		минимум	максимум
	(1)	(4)	(5)	объемный	плоский		
Гн	0,30	0,27	0,32	0,13	0,24	0,23	0,28
Пг	1,28	1,12	1,36	0,54	1,02	1,20	1,42
Кр	6,49	5,67	6,81	2,79	5,31	5,58	6,48

Примечание: (1), (4), (5) – формулы, по которым выполнены расчеты.

Результаты расчетов мощности дозы облучения с применением КДП при представлении почвы в виде объемного источника внешнего γ -излучения в 2–3 раза меньше по сравнению с инженерными методами, а при представлении в виде плоского источника сопоставимы с нижним диапазоном измеренных значений. Последнее представление вполне допустимо из-за преобладания радионуклидов в поверхностных почвенных слоях в первые годы после аварии при относительно слабом экранировании γ -излучения, хотя и не соответствует наблюдаемому реальному распределению радионуклидов в вертикальном профиле почвы. По мере прохождения процессов почвенной миграции активность поверхностных слоев будет уменьшаться, а глубинных возрастать, что не позволит однозначно принять допущение о плоском источнике, и это в наибольшей степени проявится для почв с высокой интенсивностью миграции радиоактивных веществ [10].

Заключение

Таким образом, на основе сравнения результатов ретроспективных расчетов мощности дозы и их сравнения с измеренными значениями можно констатировать, что наиболее точные расчетные оценки могут быть получены при известном характере распределения радионуклидов в вертикальном профиле почвы с применением инженерных методов. Эти методы позволяют учесть изменения геометрий источника и приемника излучения, а также могут быть интегрированы в программные средства в виде отдельных расчетных блоков. При этом для цели прогнозирования внешнего облучения наиболее целесообразна разработка комплексных миграционно-дозиметрических моделей, объединяющих прогноз миграции радионуклидов в вертикальном профиле почвы с расчетом дозы облучения от спрогнозированного содержания радиоактивных веществ в различных почвенных слоях.

Литература

1. V. Taranenko, G. Prohl, J. Gomez-Roz, «Absorbed dose rate conversion coefficients for reference terrestrial biota for external photon and internal exposures», *J. Radiological Protection*, vol. 24, № 4A, pp. A35-A62, 2004.
2. A. Ulanovsky. «Dosimetry for animals and plants: contending with biota diversity», In: *Annals of the ICRP*, vol. 45. Issue 1 supplement: Proceedings of the Third International Symposium on the System of Radiological Protection. Viena: SAGE Publications, pp. 225-238, 2016, .
3. «Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants», publication 108, London: SGSE Publications Ltd., 245 p., 2008.
4. M. Isaksson, *Environmental Dosimetry. Measurements and Calculations. In: Radioisotopes Applications in Physical Sciences*. Eds. N.Singh. Rijeka: INTERWEB, pp.175-196, 2011.
5. V. Golikov, «Air kerma rate from radionuclides distributed in forest ecosystem», *J. Environ. Radioactivity*, 2023, vol. 270, 107283.
6. Спиридонов С.И., Фесенко С.В., Гераськин С.А., Соломатин В.М., Карпенко Е.И. Оценка доз облучения древесных растений в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. №4 (48). С. 443-449.
7. Спирин Е.В. Метод расчета доз облучения животных для оценки последствий загрязнения окружающей среды // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. № 5 (49). С. 608-616.
8. Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н. Сравнение результатов расчета мощности дозы травянистых растений двумя методами // Атомная энергия. 2021. № 5 (130). С. 282-286.
9. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий. Под ред. Н.И. Санжаровой и С.В. Фесенко. М.: РАН., 2018. 278 с.
10. Переволоцкий А.Н. Закономерности миграции ^{137}Cs в основных компонентах сосняка мшистого Гомельского Полесья. Дис. на соискание ученой степени канд. с.-х. наук, Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 1995. 154 с.
11. Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. О содержании ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в лесных почвах Республики Беларусь // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. № 2(54). С. 193-200.
12. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995. 490 с.

Application of Various Methods for Estimating the Dose Rate of External Radiation in Forest Biogeocenoses

Perevolotskaya Tatiana, Perevolotsky Alexandr (Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Obninsk, Russia)

Abstract. Based on experimental data on the distribution of ^{134}Cs and ^{137}Cs in the vertical profile of forest soils, retrospective calculations of the dose rate of external pine irradiation were performed using engineering methods for infinitely extended sources of finite thickness and dose conversion coefficients recommended by the ICRP. The range of the calculated dose rate of external irradiation using engineering methods is in satisfactory agreement with the results of measurements performed using a γ -radiation dosimeter. At the same time, up to 95% of the radiation dose rate is formed due to the radiation of radionuclides located in the forest floor and the upper 2 cm layer of the mineral part of the soil. The radiation doses calculated by engineering methods and measured by a dosimeter are 2–3 times higher compared to those estimated on the basis of the KDP for a volumetric radiation source.

Keywords: radionuclides, distribution, vertical soil profile, external radiation dose, pine, forest biogeocenoses.

Т.В.Переволоцкая (к.б.н., доцент, с.н.с.), А.Н.Переволоцкий (д.б.н., в.н.с.)

НИЦ «Курчатовский институт» ВНИИРАЭ, г. Обнинск

Контакты: Aleks_Perevolotsky@mail.ru