

УДК 539.163:631.4:57.087

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПРОФИЛЕ ПОЧВЫ В ОСТРУЮ ФАЗУ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ

© 2018 г. А. Н. Переволоцкий^{1,*}, Е. В. Спирин², Т. В. Переволоцкая¹, С. И. Спиридонов¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия*

² *Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”
“Инновационно-технологический центр проекта “ПРОРЫВ”, Москва, Россия*

**E-mail: forest_rad@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.06.2017 г.

Описаны основные допущения, модель и программное средство для оценки внешнего β - и γ -облучения в вертикальном профиле почвы от радионуклидов, поступивших в биогеоценоз при разовых выпадениях, с учетом динамики их распределения в системе “поверхность растений–почва”. Проведено сравнение расчетных данных модели с альтернативными расчетными методами. Установлен определяющий вклад β -излучения от радионуклидов, находящихся на поверхности почвы и растений, в облучение биоты в верхних слоях почвенного профиля. Разработанное программное средство может быть применено для приближенной оценки доз внешнего β - и γ -облучения почвенной микро- и мезофауны, обитающей на различных глубинах в почве.

Ключевые слова: мощность поглощенной дозы, β -излучение, γ -излучение, радионуклиды, поверхностное радиоактивное загрязнение, вертикальный профиль почвы, почвенная микро- и мезофауна

DOI: 10.1134/S0869803118040148

В настоящее время неуклонно возрастает интерес к оценке дозовых нагрузок на природные организмы, поскольку они подвергаются существенному воздействию ионизирующего излучения в результате радиационных аварий [1–6]. Значимой с радиобиологической точки зрения природной компонентой является почвенная биота ввиду небольшой миграционной способности ряда ее представителей, наличия “радиочувствительных” стадий развития и обитания в поверхностных, насыщенных органикой почвенных слоях с повышенным содержанием радионуклидов [7–11]. При этом следует подчеркнуть, что вопросы формирования доз облучения почвенных организмов к настоящему времени проработаны в недостаточной степени. Так, согласно существующим подходам, расчеты дозовых нагрузок на эти организмы проводятся для квазистационарных радиоэкологических ситуаций исходя из предположения о равномерном распределении радионуклидов в пределах 50-см слоя почвы с помощью коэффициентов дозового преобразования [12, 13]. Подобный подход применен в ряде программных средств, в частности, ERICA [13, 14] и Resrad Biota [15].

На наш взгляд, остается открытым вопрос о корректности расчетов мощности поглощенной дозы от внешнего β - и γ -излучения в вертикаль-

ном профиле почвы в острую фазу радиоактивных выпадений, что связано с формированием двух мощных источников ионизирующего излучения: от радионуклидов, задержанных надземной фитомассой растений и поступивших на поверхность почвы. Проведенные в этом направлении исследования позволяют сформулировать основные допущения и разработать программное средство для оценки доз внешнего облучения на различных глубинах в почве, а также создать теоретические основы для оценок доз некоторых видов почвенной биоты в первые месяцы после разовых радиоактивных выпадений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

При разработке модели формирования поглощенной дозы внешнего облучения в вертикальном профиле почвы принят ряд допущений. Предполагается поступление радионуклидов в модельный биогеоценоз в результате разовых радиоактивных выпадений. В качестве модельных биогеоценозов выбраны средневозрастные модалные сосновые насаждения класса II возраста [16], сельскохозяйственные биогеоценозы с зерновыми культурами, луговые биогеоценозы [17]. Радиоактивное загрязнение этих объектов определяется задерживанием радионуклидов надзем-

ной фитомассой растений и загрязнением поверхностного слоя почвы. Прогнозирование мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы осуществляется с мая по октябрь. В течение рассматриваемого временного периода происходит удаление радионуклидов с поверхности растений на поверхность почвы. Процессами миграции радионуклидов в глубь вертикального профиля почвы пренебрегали. Почва принимается как однородная среда в пределах исследуемой глубины.

Поглощенная доза в вертикальном профиле почвы формируется от внешнего β - и γ -облучения от поверхностного слоя почвы (бесконечный тонкий источник) и блока растений (бесконечный источник конечной толщины, равный высоте растений). В последнем случае предполагается равномерное распределение радионуклидов на поверхности растений по всей их высоте.

Дозовая нагрузка от инертных радиоактивных газов не учитывается, что связано с их распространением в атмосфере и радиационным воздействием на биоту только за время существования облака выброса.

Расчет мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы проводили исходя из величин плотности выпадений радионуклидов на исследуемый биогеоценоз на произвольном расстоянии от источника выброса. Плотность выпадений рассчитывали с помощью Гауссовой модели рассеяния радионуклидов в атмосфере в случае разовых выбросов [18].

Активность i -го радионуклида в блоке лесной, сельскохозяйственной или травянистой растительности ($\sigma_{\text{раст}, i}$), произрастающей на единице площади почвы, рассчитывали на основе следующей зависимости:

$$\sigma_{\text{раст}, i}(t) = \sigma_{\text{вып}, i} K_3 e^{(-\lambda_{\text{эфф}}, i)t}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{вып}, i}$ – величина плотности выпадений i -го радионуклида из приземного слоя атмосферы, Бк/м²; K_3 – коэффициент первичного задерживания (доля задержанного растительностью радионуклида от величины $\sigma_{\text{вып}, i}$), отн. ед.; $\lambda_{\text{эфф}}$ – константа, учитывающая экологическое очищение и радиоактивный распад, сут⁻¹.

Динамику поверхностной активности i -го радионуклида в поверхностном слое почвы описывали формулой:

$$\sigma_{\text{почв}, i}(t) = \sigma_{\text{вып}, i} e^{(-\lambda_{\text{расп}, i}t)} (1 - K_3 e^{(-\lambda_{\text{очищ}, i}t)}), \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{очищ}, i}$ – постоянная очищения, сут⁻¹, $\lambda_{\text{расп}, i}$ – константа радиоактивного распада, сут⁻¹.

В формулах (1) и (2) постоянная очищения надземной фитомассы ($\lambda_{\text{очищ}}$) принята 0.0495 сут⁻¹ для зерновых культур и луговых трав (соответствует периоду полуочищения 14 сут) и

0.0077 сут⁻¹ для сосны (90 сут) [17]. Коэффициент задерживания радиоактивных выпадений надземной фитомассой (K_3) по умолчанию принят 0.7 для лесных биогеоценозов и 0.3 – для сельскохозяйственных и луговых [17].

Динамику мощности поглощенной дозы γ -излучения на глубине почвы x от радионуклидов, находящихся в течение времени прогнозирования в тонком бесконечном слое на поверхности почвы, описывали следующей формулой [19], Гр/с:

$$P_{\text{почв}, \gamma, i}(x, t) = 2\pi K_{\gamma, i} \sigma_{\text{почв}, i}(t) \times \left[E_1(\mu_s x) + \frac{a}{1-b} e^{-(1-b)(\mu_s x)} \right], \quad (3)$$

где $K_{\gamma, i}$ – дифференциальная λ -постоянная, (Гр/с)/(Бк/м²) [19]; $\sigma_{\text{почв}, i}(t)$ – поверхностная активность i -го радионуклида в почве в момент времени t , Бк/м²; $E_1(\mu_s x)$ – интегрально-показательная функция первого рода; μ_s – массовый коэффициент ослабления λ -излучения в почве, м²/кг; x – расстояние от поверхности в почве, кг/м²; a, b – коэффициенты для расчета дозового фактора накопления функции Бергера [20].

Динамику мощности поглощенной дозы β -излучения на глубине почвы x от радионуклидов, осевших на поверхность почвы для $\rho_s x < R_m$, описывали следующей формулой, Гр/с [21]:

$$P_{\text{почв}, \beta, i}(x, t) = \sigma_{\text{почв}, i}(t) \frac{a_{21} n_{\beta} \bar{E}_{\beta} k}{2\pi} \times \left(\frac{A}{v_1} [e^{-v_1 \rho_s x} - e^{-v_1 R_m}] + B [E_1(v_2 \rho_s x) - E_1(v_2 R_m)] + C [E_1(v_3 \rho_s x) - E_1(v_3 R_m)] \right), \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{почв}, i}(t)$ – поверхностная активность i -го радионуклида в почве в момент времени t , Бк/см²; n_{β} – выход β -частиц на распад, отн. ед.; \bar{E}_{β} – средняя энергия β -излучения, МэВ; k – коэффициент, 1.6×10^{-10} , (г Гр)/(МэВ); ρ_s – эквивалентная плотность среды (например, почвы), равная $a_{21} \rho_{\text{среды}}$ ($\rho_{\text{среды}}$ – плотность среды распространения излучения, г/см³; $a_{21} = 0.89$); $E_1(x)$ – интегрально-показательная функция первого рода; A, B, C, v_1, v_2, v_3 – безразмерные параметры, зависящие от максимальной энергии β -излучения; R_m – максимальный пробег β -частицы в воздухе, см.

При $\rho_s x \geq R_m$ мощность поглощенной дозы $P_{\text{почв}, \beta, i}(x) \equiv 0$.

Для расчета дозовой нагрузки в вертикальном профиле почвы от радионуклидов, находящихся на поверхности растений, принято допущение о равномерном распределении активности по высоте надземной фитомассы. При этом рассматривается бесконечный блок растительности конечной толщины, равный высоте растений с равно-

мерно распределенными в ней радионуклидами, величина мощности дозы определяется исходя из содержания радионуклидов в однородной воздушно-растительной среде.

Динамика мощности поглощенной дозы γ -излучения на различной глубине почвы x от радионуклидов, задержанных растениями (источник излучения – блок растительности конечной толщины d с равномерно распределенной удельной активностью $q(t)$ по высоте надземной фитомассы), описывали следующей формулой, Гр/с [19]:

$$P_{\text{раст},\gamma,i}(x,t) = \frac{2\pi K_{\gamma,i} q(t)}{\mu_s} \times \left\{ e^{-\mu x} - \mu x E_1(\mu x) - e^{-(\mu_s d - \mu x)} + (\mu_s d + \mu x) E_1(\mu_s d + \mu x) + \frac{a}{(1-b)^2} [e^{-(1-b)\mu x} - e^{-(1-b)(\mu_s d + \mu x)}] \right\}, \quad (5)$$

где $q(t)$ – удельная активность в воздушно-растительной среде, Бк/кг; d – толщина блока растений, м; μ – массовый коэффициент ослабления γ -излучения в блоке растений, м²/кг (остальные обозначения аналогичны формуле 4).

Мощность поглощенной дозы β -излучения (Гр/с) при условии $\rho_a x < R_m$ представляет сумму вкладов от трех составляющих:

$$P_{\text{раст},\beta,i}(x,t) = \tau(t) \frac{a_{21} n_{\beta} \bar{E}_{\beta} k}{2\pi} [P_1(x) + P_2(x) + P_3(x)], \quad (6)$$

где $\tau(t)$ – объемная активность однородной воздушно-растительной среды, Бк/см³; $P_1(x)$, $P_2(x)$ и $P_3(x)$ – слагаемые величины мощности дозы.

Для полубесконечного источника с эквивалентной плотностью почвы ρ_s (г/см³) и однородной воздушно-растительной среды ρ_a (г/см³) с равномерно распределенной активностью по высоте растений расчет P_1 , P_2 и P_3 проводится по формулам:

$$P_1(x) = \frac{A}{v_1} \left[\frac{e^{-v_1 \rho_a x} - e^{-v_1 R_m}}{v_1 \rho_s} - \frac{R_m - \rho_a x}{\rho_s} e^{-v_1 R_m} \right] \quad (7)$$

$$P_2(x) = B \left\{ \frac{1}{v_2 \rho_s} [e^{-v_2 \rho_a x} - e^{-v_2 R_m} + v_2 (R_m E_1(v_2 R_m) - \rho_a x E_1(v_2 \rho_a x))] - \frac{R_m - \rho_a x}{\rho_s} E_1(v_2 R_m) \right\} \quad (8)$$

$$P_3(x) = C \left\{ \frac{1}{v_3 \rho_s} [e^{-v_3 \rho_a x} - e^{-v_3 R_m} + v_3 (R_m E_1(v_3 R_m) - \rho_a x E_1(v_3 \rho_a x))] - \frac{R_m - \rho_a x}{\rho_s} E_1(v_3 R_m) \right\}. \quad (9)$$

Мощность поглощенной дозы для почвенной микро- и мезофауны принята эквивалентной рассчитанному значению мощности поглощенной дозы от внешнего β - и γ -излучения на рассматриваемой глубине почвы x , при этом экранирование излучения поверхностными покровами исследуемых групп животных предполагали пренебрежимо малым.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе формул (1)–(9) было разработано программное средство по расчету мощности дозы внешнего облучения почвенной биоты на языке Object Pascal в среде программирования Lazarus v.1.6, распространяемой на основе свободной лицензии GNU General Public License. Алгоритм расчета представлен на рис. 1.

Программа основана на диалоговом режиме работы и использует интуитивно понятный пользователю интерфейс. В качестве входной информации пользователь задает (рис. 2):

- тип биогеоценоза (лесной, луговой, агро-биогеоценоз);
- коэффициент задерживания аэральных радиоактивных выпадений элементами надземной фитомассы растений, отн. ед.;
- характеристики растительного покрова: высота, м и биомасса, кг/м²;
- плотность поверхностного слоя почвы, кг/м³;
- время с момента радиоактивных выпадений, сут. В заданный пользователем момент времени производится расчет мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы с оценкой вклада в дозовый показатель различных источников β - и γ -излучения от поверхностного слоя почвы и растительности с последующим выводом информации в графической и табличной формах;
- расстояние от источника выброса, на котором производится определение характеристик радиоактивного загрязнения и расчет мощности поглощенной дозы, м;
- продолжительность аварийного выброса, с;
- высота выброса, м;
- скорость ветра на высоте флюгера, м/с;
- категория устойчивости атмосферы по Пасквиллу. Пользователь осуществляет выбор одной из шести предопределенных в программе категорий устойчивости атмосферы на момент выброса: от предельно неустойчивой с развитой конвекцией (А) до устойчивого состояния (F);
- аэродинамическая шероховатость земной поверхности, см. Пользователь выбирает одно из четырех предопределенных в программе величин аэродинамической шероховатости: от 10 см, соответствующей открытым участкам земной по-

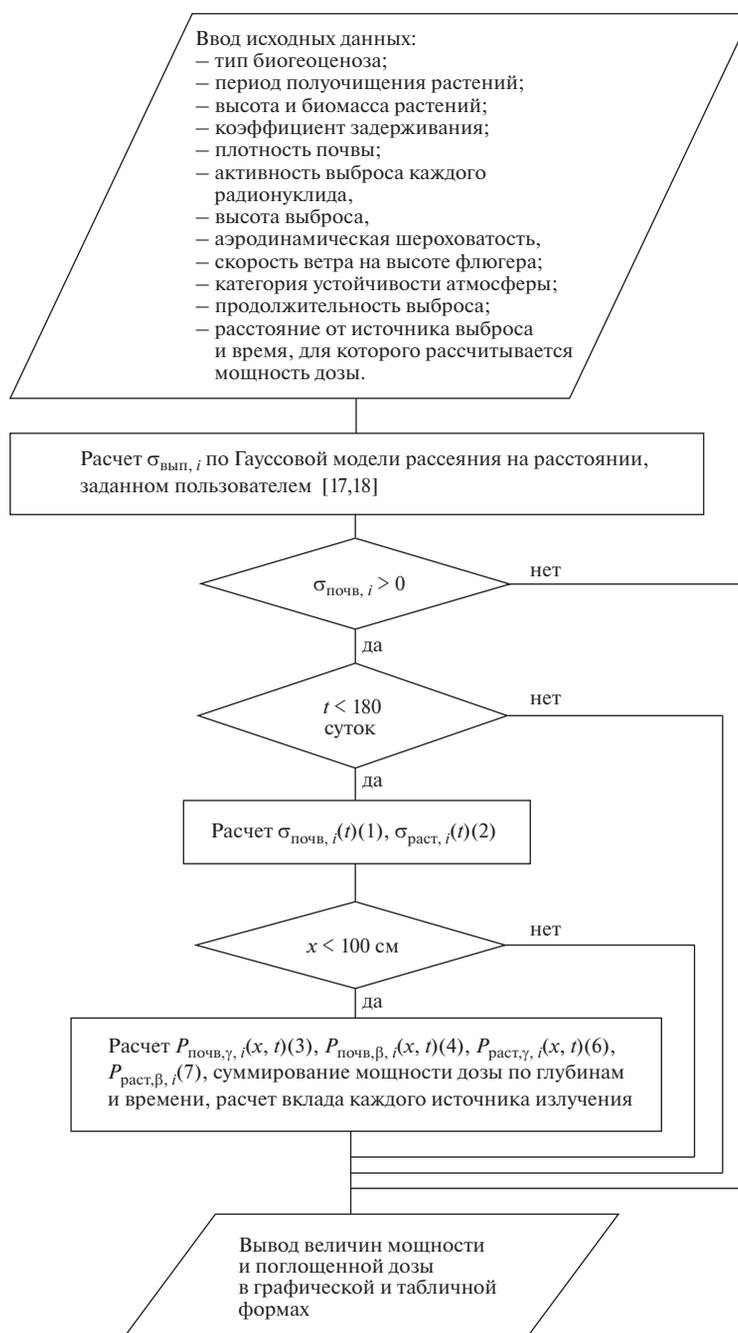


Рис. 1. Алгоритм расчета мощности поглощенной дозы внешнего β - и γ -излучений в вертикальном профиле почвы.

верхности, до 400 см, соответствующей пересеченной местности.

В программном средстве используется по умолчанию predetermined набор входных данных для типов биогеоценозов и условий выброса, при этом пользователь может их корректировать в соответствии с имеющейся у него информацией.

Нажатие на кнопку “Расчет доз” запускает процесс расчета мощности дозы, “Завершение

работы” – позволяет корректно закончить работу программы.

Ввод значения активности разового выброса в таблице осуществляется напротив соответствующего радионуклида, при этом пользователь может откорректировать и величину скорости гравитационного осаждения. Энергетические характеристики радионуклидов (энергия МэВ на распад по β - и γ -излучениям, дифференциальная γ -постоянная для γ -квантов, средняя и макси-

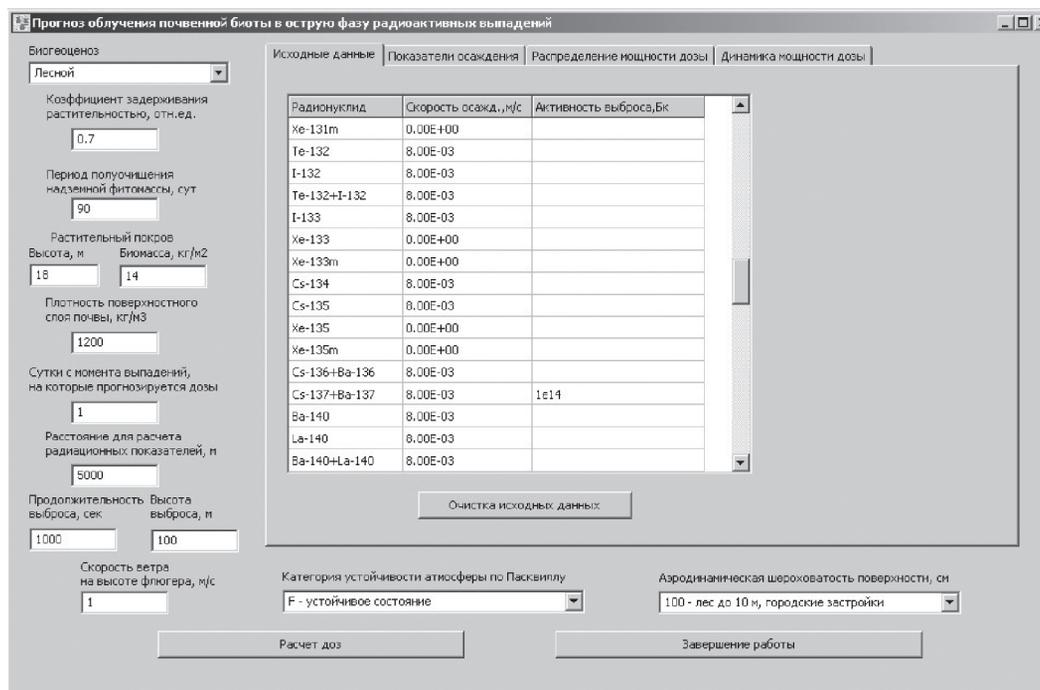


Рис. 2. Закладка “Ввод исходных данных” программного средства по оценке доз облучения почвенной биоты в острую фазу радиоактивных выпадений.

мальная энергия β -излучения, выход на распад γ -квантов) находятся в специально подготовленной библиотеке, которая является неотъемлемой частью программного средства и применяется при расчетах дозовых показателей в соответствии с формулами (3)–(6).

Исходя из заданных пользователем входных данных, рассчитывается интегральная и осредненная за время выброса объемная активность, а также плотности выпадений каждого радионуклида на земную поверхность с помощью Гауссовой модели рассеяния. Данные по плотности выпадений радионуклидов являются исходными для расчета мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы.

Результаты расчетов отображаются на трех вкладках: “Показатели осадения”, “Распределение мощности дозы” и “Динамика мощности дозы”.

Вкладка “Показатели осадения” носит информационный характер и отражает величины интегральной и осредненной объемных активностей в атмосфере, плотности выпадений на земную поверхность для каждого из радионуклидов на заданном пользователем расстоянии.

На закладке “Распределение мощности дозы” в табличной и графической форме приводятся данные о мощности поглощенной дозы на различных глубинах x вертикального профиля почвы для источников β - и γ -излучения от радионукли-

дов на поверхности почвы и распределенных в слое растительности (рис. 3).

Следует отметить, что в данной таблице значения мощности поглощенной дозы суммируются по каждому из радионуклидов, для которых введены активность разового выброса и величина гравитационного осадения больше нуля. Индивидуальные значения мощности дозы по каждому радионуклиду от отдельных источников и на различных глубинах не приводятся с целью компактного представления информации для дальнейшего анализа. Наиболее важными показателями, на наш взгляд, являются мощность поглощенной дозы и значения вкладов от различных источников на разных глубинах.

На закладке “Динамика мощности дозы” приводятся данные о суммарной мощности поглощенной дозы в течение полугода с момента радиоактивных выпадений (с мая по октябрь). Выбор данного периода времени обусловлен наиболее интенсивным характером распределения радионуклидов в биогеоценозе, связанным с поверхностным очищением фитомассы и увеличением активности на поверхности почвы.

Верификация модели проведена путем сравнения результатов расчета мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы на основе разработанных нами формул (3)–(6) с расчетными формулами, опубликованным в научной литературе [22–24]. Так, результаты расчетов мощно-

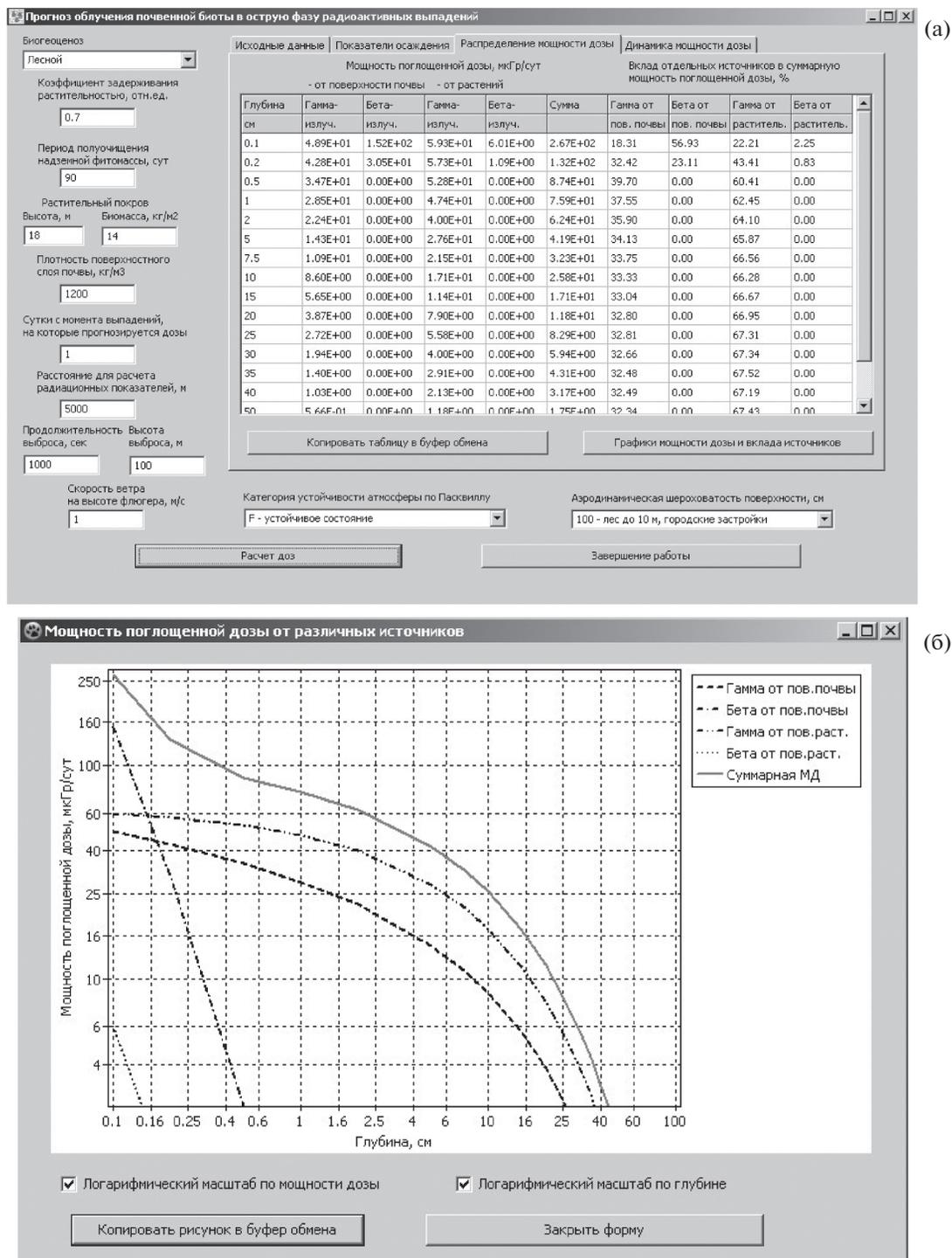


Рис. 3. Вывод результатов расчета мощности дозы на вкладке "Распределение мощности дозы" программного средства по оценке доз облучения почвенной биоты в острую фазу радиоактивных выпадений: а – в табличной форме; б – в графической форме.

сти поглощенной дозы γ -излучения от поверхностного слоя почвы (3) из настоящей статьи сравнивали с результатами, полученными по формулам (2) из [22] и (7.1) из [23], от растений (5)

из настоящей работы – с (2) из [22] (табл. 1). Мощность поглощенной дозы β -излучения от поверхностного слоя почвы в настоящей работе рассчитывали согласно (4) и сравнивали с резуль-

Таблица 1. Результаты верификации расчета мощности поглощенной дозы в почве от γ -излучения радионуклидов, находящихся на поверхности почвы и растений, мкГр/сут

Глубина, см	Мощности поглощенной дозы в почве от γ -излучения радионуклидов							
	находящихся на поверхности почвы				находящихся на растениях			
	мкГр/сут			отклонение, %		мкГр/сут		отклонение, %
	(3)	(2) из [22]	(7.1) из [23]	(3) и (2) из [22]	(3) и (7.1) из [23]	(6)	(2) из [22]	
0.2	2.52E-01	2.79E-01	2.95E-01	-10.7	-17.1	2.23E-01	2.58E-01	-15.7
0.5	2.06E-01	2.38E-01	2.48E-01	-15.5	-20.4	1.85E-01	2.18E-01	-17.8
1	1.71E-01	2.02E-01	2.12E-01	-18.1	-24.0	1.54E-01	1.85E-01	-20.1
2	1.34E-01	1.63E-01	1.79E-01	-21.6	-33.6	1.22E-01	1.49E-01	-22.1
5	8.45E-02	1.04E-01	1.31E-01	-23.1	-55.0	7.68E-02	9.52E-02	-24.0
10	4.76E-02	5.71E-02	8.79E-02	-20.0	-84.7	4.34E-02	5.26E-02	-21.2
15	2.88E-02	3.35E-02	5.84E-02	-16.3	-102.8	2.62E-02	3.07E-02	-17.2
20	1.79E-02	2.00E-02	3.80E-02	-11.7	-112.3	1.63E-02	1.83E-02	-12.3
25	1.13E-02	1.20E-02	2.43E-02	-6.2	-115.0	1.03E-02	1.10E-02	-6.8
30	7.20E-03	7.33E-03	1.54E-02	-1.8	-113.9	6.56E-03	6.70E-03	-2.1
40	2.98E-03	2.75E-03	5.98E-03	7.7	-100.7	2.71E-03	2.51E-03	7.4
50	1.25E-03	1.05E-03	2.29E-03	16.0	-83.2	1.14E-03	9.56E-04	16.1
75	1.48E-04	9.88E-05	2.07E-04	33.2	-39.9	1.35E-04	9.27E-05	31.3
100	1.81E-05	9.65E-06	1.95E-05	46.7	-7.7	1.65E-05	8.82E-06	46.5

Таблица 2. Результаты верификации расчета мощности поглощенной дозы в почве от β -излучения радионуклидов, находящихся на поверхности почвы и растений, мкГр/сут

Глубина, см	Мощность поглощенной дозы для почвенной биоты от радионуклидов					
	находящихся на поверхности почвы			находящихся на растениях		
	мкГр/сут		отклонение, %	мкГр/сут		отклонение, %
	(4)	(20) из [24]		(7)	(28) из [24]	
0.2	4.36	4.25	2.5	4.40	3.15	28.4
0.5	1.19	1.45	-21.8	1.02	0.93	8.3
1	0.058	0.27	-360.2	0.00	0.13	-

татами расчетов согласно (20) из [24], а от растений – согласно (6) из нашей работы и сравнивали с (28) из [24] (табл. 2).

Как следует из представленных в табл. 1 результатов расчетов, все три формулы позволили получить сопоставимые между собой значения мощности поглощенной дозы на одинаковых глубинах. При этом гораздо меньшую степень отклонений рассчитанных значений мощности дозы от тонкого бесконечного источника продемонстрировало применение формул (3) из настоящей работы и (2) из [22] – менее 23% в верхней части почвенного профиля (до 20 см). По мере заглубления (>50 см) отклонение в расчете мощности поглощенной дозы тем выше, чем для большей глубины проводится расчет. Важно отметить, что

данные формулы отличаются применением различных аппроксимационных функций факторов накопления: Тейлора в (2) из [22] и Бергера – в настоящей работе. Применение формулы (7.1) из [23] при расчете мощности поглощенной дозы в почве оправдано только в поверхностных почвенных слоях, а в середине почвенного профиля различия в мощности дозы достигают двух раз.

Рассматривая мощность поглощенной дозы от β -излучения радионуклидов, находящихся на поверхности почвы и растений (табл. 2), следует констатировать очень малое расстояние от поверхности, на котором мощность поглощенной дозы отлична от нуля. Это связано с небольшой величиной максимального пробега β -частиц в

почве даже для ^{106}Rh с максимальной энергией β -излучения 3.5 МэВ. Установлена удовлетворительная сходимости результатов, полученных согласно (4) и (6) из настоящей работы относительно формул Левингера (20) и (28) из [24]. На глубине менее 0.5 см от поверхности почвы мощность поглощенной дозы, рассчитанная по вышеотмеченным формулам, не отличается больше чем на 30%. Однако в работе [21] показано, что формулы Левингера завышают значения мощности поглощенной дозы β -излучения на расстояниях, сопоставимых с величиной свободного пробега электронов.

Таким образом, приведенный верификационный расчет позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, результаты расчета мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы для обоих видов и источников излучения по формулам, примененным в настоящей модели и имеющимся в научной литературе, позволяют получить сопоставимые результаты. Соответственно с высокой вероятностью можно предположить, что величины мощности поглощенной дозы, рассчитанные с помощью программного средства, адекватно отражают картину распределения поля излучения в почве. Во-вторых, исключительно важна роль β -излучения в формировании поглощенной дозы вблизи поверхности почвы: до 95% дозовой нагрузки обусловлено данным видом излучения. Соответственно для почвенных организмов, обитающих вблизи поверхности почвы (например, подстилочных сапротрофов), при условии эквивалентности мощности поглощенной дозы в почве и в организме могут быть сформированы довольно высокие дозы облучения. Роль γ -излучения становится определяющей в почвенных слоях глубже 2 см, однако по абсолютной величине уровень облучения в этих слоях на два порядка ниже относительно β -излучения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанное программное средство позволяет рассчитать величины мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы на ранних стадиях поступления радионуклидов в биогеоценоз и, исходя из полученных значений, оценить поглощенные дозы для почвенной микро- и мезофауны, обитающей на тех же глубинах. Данный временной этап весьма специфичен, что связано со значительным влиянием на формирование облучения поверхностного радиоактивного загрязнения растений. Показано [1–5], что непосредственно после выпадений до 95% активности может находиться в надземной фитомассе, постепенно перемещаясь на поверхность почвы в течение первых месяцев после выпадений. При этом роль миграционных процессов в заглуплении радионуклидов в вертикальном профиле

почвы относительно невысока [25, 26] и излучение от поверхности почвы можно рассматривать как от плоского источника. Таким образом, представление о формировании доз внешнего облучения в почве от β - и γ -излучений радионуклидов, задержанных поверхностью растений (геометрия — бесконечный блок конечной толщины) и поступивших на поверхность почвы (геометрия — бесконечный тонкий источник), представляет вполне логичным. При соблюдении условия эквивалентности мощности дозы от β - и γ -излучения в почвенном организме и в почве на одинаковой глубине рассчитанные значения мощности поглощенной дозы могут быть применены для оценок внешнего облучения некоторых видов почвенной биоты.

В данном аспекте разработанное программное средство отличается от существующих программных средств ERICA, RESRAD-Biota и др., которые предназначены для оценки поглощенных доз облучения референтных организмов при условии хронического облучения. В них не отражена специфика формирования радиационной обстановки на ранних этапах после аварийных выпадений. Мощность дозы для почвенной биоты рассчитывается исходя из предположения о нахождении почвенного организма в середине слоя почвы 0–50 см с равномерным распределением в нем радионуклида [12]. Это допущение не соответствует условиям формирования радиационной обстановки в первые месяцы после радиоактивных выпадений с преобладанием поверхностного радиоактивного загрязнения растений и почвы. Таким образом, разработанное программное средство позволяет получить предварительные оценки доз внешнего облучения видов почвенной биоты на ранних стадиях формирования радиационной обстановки после радиоактивных выпадений, что невозможно сделать корректно в существующих программных продуктах.

Другим важным аспектом применения разработанного программного средства является учет удаления радионуклидов с поверхности растений и их перемещения на поверхность почвы, что позволяет описать особенности динамики формирования мощности поглощенной дозы и вклада различных источников излучения.

Следует отметить, что формулы, примененные для расчета мощности поглощенной дозы, отражают исследуемые показатели с определенной погрешностью. В частности отмечено [19], что максимальные отклонения в величинах фактора накопления, рассчитанные с помощью параметров a и b (3) и на основе интерполяционной формулы, предложенной Бергером [20], не отличаются более чем на 30% при значениях μ_x менее 7. Хотя на практике вклад источников на большем расстоянии пренебрежимо мал.

Сложность сопоставления полученных нами результатов с данными других исследователей определена тем, что для биологических объектов [24] большинство дозиметрических исследований проводилось, главным образом, на воде и биологических тканях. К сожалению, данных о расчетах дозовых функций ослабления и факторов накопления по γ -излучению для почвы в научной литературе найти не удалось. В работах [19, 21] отмечена удовлетворительная сходимости значений мощности поглощенной дозы для воздуха и бетона (как веществ с наиболее близким эффективным атомным номером к почве) с аналогичными дозовыми показателями, рассчитанными с применением метода Монте-Карло. При этом отмечается [19], что для распределенного источника удовлетворительная точность оценок мощности дозы может быть получена для широкого спектра энергий γ -излучения за счет преобладания радионуклидов в поверхностном слое почвы, что и наблюдается в острую фазу радиоактивных выпадений.

Оценка мощности поглощенной дозы β -излучения на различных глубинах почвы согласно (4) и (6) из настоящей работы базируется на интегрировании дозовой функции точечного источника с единственным спектром [21] и основана на анализе табулированных Бергером распределений мощности дозы β -излучения различных радионуклидов от точечного источника в воде. Расчеты позволяют получить непрерывное распределение мощности дозы вплоть до расстояния максимального пробега β -частицы одиночного спектра, а параметры уравнения зависят только от величины максимальной энергии. Подобный подход позволяет получить более точные оценки мощности поглощенной дозы β -излучения, особенно на расстояниях, близких к величине максимального пробега β -частицы по сравнению с наиболее простой и используемой функцией ослабления излучения, предложенной Левингером [24]. Модификации формулы Левингера, предложенные другими исследователями (анализ модификаций приведен в [21]), позволили получить сопоставимые с нашими результатами распределения мощности дозы β -излучения в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и реализована в виде программного средства модель формирования дозы внешнего облучения в вертикальном профиле почвы от β - и γ -излучения радионуклидов, поступивших в биогеоценоз при разовых выпадениях. Модель предназначена для оценки мощности дозы на различных глубинах в почве в острую фазу радиоактивных выпадений, непосредственно в первые месяцы после поступления радионуклидов в экосистему. Учитывается задерживание и перерас-

пределение радионуклидов в системе “растение—поверхность почвы”, что позволяет исследовать динамику мощности поглощенной дозы β - и γ -излучения радионуклидов от бесконечного плоского источника (поверхность почвы) и от бесконечного источника конечной толщины (растительный покров), а также вклад в суммарную мощность дозы различных источников и видов излучений. Учет поверхностного характера радиоактивного загрязнения почвы и растений в первые полгода после радиоактивных выпадений и динамики распределения радионуклидов в системе “растение—поверхность почвы” отличает разработанное программное средство от существующих программных продуктов ERICA, RESRAD-Biota и др., предназначенных для оценок доз в условиях хронического облучения и равномерного распределения радионуклидов по всей глубине почвенного профиля.

Верификация разработанного программного средства свидетельствует об удовлетворительной сходимости результатов расчета мощности дозы, выполненных с использованием разработанного программного средства и на основе дозиметрических моделей, представленных в научной литературе [22–24].

Максимальные дозовые нагрузки формируются в поверхностных почвенных слоях, при этом вклад β -излучения, варьирующий в зависимости от состава радиоактивных выпадений и типа рассматриваемого биогеоценоза, может достигать 95%. При этом следует отметить, что вклад дозовых нагрузок от радионуклидов, находящихся на поверхности почвы и распределенных в растительном слое, сопоставим. Значительный вклад β -излучения в облучение поверхностных почвенных слоев определяет необходимость оценки радиационного воздействия на представителей почвенной биоты, обитающих в верхних горизонтах почвенного профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Криволицкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А. и др.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Наука, 1988. 240 с.
2. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территорий продуктами деления урана / Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
3. *Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений. СПб.: Наука, 1994. 256 с.
4. Радиоактивное загрязнение территории Беларуси (В связи с аварией на ЧАЭС) / Под ред. В.И. Парфенова и Б.И. Якушева. Минск: Наука и техника, 1995. 582 с.
5. *Абатуров Ю.Д., Абатуров А.В., Быков А.В. и др.* Влияние ионизирующего излучения на сосновые

- леса в ближней зоне Чернобыльской АЭС. М.: Наука, 1996. 240 с.
6. Крупные радиационные аварии: Последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М.: Издат, 2001. 752 с.
 7. *Криволицкий Д.А.* Радиоэкология почвенных животных. М.: Наука, 1985. 182 с.
 8. *Krivilutsky D.A.* Earthworms as bioindicators of increased radioactivity // Proceedings of the International Symposium on Earthworms / Eds A.M. Pagliai, P. Omedeo. Bologna, 1987. P. 401–408.
 9. *Криволицкий Д.А., Покаржевский А.Д., Усачев В.Л.* Эффекты радиоактивного загрязнения окружающей среды для почвенной фауны в зоне аварии на Чернобыльской АЭС // Экология. 1990. Т. 6. С. 32–42.
 10. *Moment G.B.* Recovery and abscopal effect after inhibitory X-irradiation in earthworm regeneration // J. Exp. Zool. 1972. V. 181. № 1. P. 33–40.
 11. *Suzuki J.* Mortality of the earthworms, *Eisenia fetida*, after gamma radiation at different stages their life history // J. Radiat. Res. 1983. V. 24. №3. P. 209–220.
 12. Защита окружающей среды: концепция и использование референтных животных и растений. Публикация МКРЗ 108: Пер. с англ. М.: Академ-Принт, 2013. 216 с.
 13. *Brown J.E., Alfonso B., Avila R. et al.* The ERICA Tool // J. Environ. Radiat. 2008. V. 99. №9. P. 1371–1383.
 14. *Brown J.E., Alfonso B., Avila R. et al.* A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals // J. Environ. Radiat. 2016. V. 153. №3. P. 141–148.
 15. A Graded Approach for Evaluating Radiation Doses to Aquatic and Terrestrial Biota / DOE-STD-1153-2002 // Washington: U.S. Dept. Energy, 2002. 282 p.
 16. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Междунар. ин-т прикладного системного анализа, 2008. 886 с.
 17. Методика разработки нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ДВ-2010). В 2 т. Т. 2. Технические приложения, рекомендации для расчетов. 2010. 216 с.
 18. *Гусев Н.Г., Беляев В.А.* Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
 19. *Спирин Е.В.* Метод расчета доз облучения животных для оценки последствий загрязнения окружающей среды // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49. № 5. С. 608–616.
 20. *Машкович В.П., Кудрявцева А.В.* Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
 21. *Спирин Е.В., Пименов Е.П.* Разработка дозиметрических моделей для оценки доз облучения почвенного микробоценоза и мезофауны при радиоактивном загрязнении окружающей среды. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2011. 55 с.
 22. *Спирidonov С.И., Фесенко С.В., Гераськин С.А. и др.* Оценка доз облучения древесных растений в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 4. С. 443–449.
 23. *Израэль Ю.А.* Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: Прогресс-погода, 1996. 355 с.
 24. Радиационная дозиметрия / Под ред. Дж. Хайна и Г. Браунелла: Пер. с англ. М.: Иностран. лит., 1958. 758 с.
 25. *Прохоров В.М.* Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические процессы и моделирование / Под общ. ред. Р.М. Алексахина. М.: Энергоатомиздат, 1981. 98 с.
 26. *Силантьев А.Н., Шкуратова И.Г.* Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. М.: Атомиздат, 1984. 156 с.

Model for Calculating the Distribution of Absorbed Dose Rate in the Vertical Soil Profile in the Acute Phase of Radioactive Fallout

A.N. Perevolotsky^{a,#}, E.V. Spirin^b, T.V. Perevolotskaya^a, and S.I. Spiridonov^a

^a Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

^b Private institution of the State Atomic Energy Corporation "Rosatom" "Innovative and Technological Center of the Project" PRORIV, Moscow, Russia

[#] E-mail: forest_rad@mail.ru

The basic assumptions, model and software to estimate the dose distribution of external β - and γ -irradiation in the vertical soil profile are described for radionuclides entering biogeocoenosis from single fallout. Furthermore, the dynamics of their distribution in the surface of the "plants-soil" system was taken into account. The model was verified with alternative calculation methods. Significant contribution into exposure of the upper layers of the soil profile was established from β -emitting radionuclides appearing on the surface of soil and plants. The developed software can be applied to estimate the external doses from β - and γ -radiation to soil micro- and mesofauna living at various depths in the soil profile.

Keywords: absorbed dose rate, β -radiation, γ -radiation, radionuclide, surface radioactive contamination, vertical soil profile, soil micro- and mesofauna