

УДК 539.163:582.475.4:631.45:502.05:614.876

## ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ПОСЛЕ АВАРИЙНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ

© 2022 г. Т. В. Переволоцкая<sup>1</sup>, А. Н. Переволоцкий<sup>1</sup>, С. А. Гераськин<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

\*E-mail: stgeraskin@gmail.com

Поступила в редакцию 14.05.2021 г.

После доработки 28.10.2021 г.

Принята к публикации 09.11.2021 г.

Представлено программное средство для оценки динамики мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения по высоте древостоя сосновых насаждений в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений с учетом динамики их перераспределения между компартментами системы “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы”. Сформулированы основные допущения реализации программного средства с применением методов математического моделирования. Оценка осаждения радионуклидов на земную поверхность базируется на гауссовой модели атмосферной диффузии. Модельный (компаратментный) подход динамики перераспределения активности радионуклида из состава радиоактивных выбросов представлен решением системы линейных дифференциальных уравнений I порядка. Расчет мощности поглощенной дозы основан на интегрировании дозовой функции ослабления точечного источника излучения. Установлен определяющий вклад  $\beta$ -излучения от радионуклидов, находящихся на поверхности исследуемых компартмент системы. Методический подход, учитывающий динамику распределения радионуклидов в системе “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы” и связанные с ней дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения по высоте древостоев сосновых насаждений в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений, реализован в виде программного средства и может быть применен при решении задач обеспечения радиационной безопасности окружающей среды.

**Ключевые слова:** радиоактивность, поверхность кроны древесных растений, поверхностный слой почвы, радионуклиды,  $\beta$ -излучение,  $\gamma$ -излучение, аварийные радиоактивные выпадения, мощность поглощенной дозы, сосновые насаждения, аварийный выброс

DOI: 10.31857/S0869803122010118

Для обеспечения радиологической защиты окружающей среды в условиях интенсивного развития ядерных технологий возрастает потребность разработки системы оценки рисков облучения биоты [1–5]. К настоящему времени разработаны концепция референтных организмов и основные подходы по проведению дозиметрических оценок, исследованы зависимости и диапазон эффектов облучения от величины поглощенной дозы для референтных организмов [4, 6, 7]. Однако существующие допущения при расчете доз облучения биоты ограничиваются условиями квазиравновесного распределения радионуклидов между компонентами биогеоценоза, а также постоянными физическими и геометрическими параметрами источника и приемника излучения. Кроме того, при малых и больших размерах референтного организма относительно свободного пробега переносчиков излучения существенны

расхождения в расчетных и измеренных величинах доз [8], что требует учета геометрического фактора и не исключает проведение дозиметрических оценок на основании иных расчетных методов.

Авторы концепции референтного организма [4, 6, 7] отмечают необходимость дальнейшего совершенствования дозиметрических моделей, в частности для сосны обыкновенной, как одного из наиболее радиочувствительных видов. В соответствии с существующими допущениями для этого организма оценивают дозу внешнего  $\gamma$ - и внутреннего  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений только на слой активно растущей древесины, пренебрегая оценкой радиационного воздействия на генеративные органы. Вместе с тем исследования, проведенные в острую фазу аварийных радиоактивных выпадений [9–13], свидетельствовали о формировании значительных доз облучения в кронах древесных

растений из-за сильной задерживающей способности по отношению к радиоактивным выпадениям и связанных с облучением радиационно-индуцируемых эффектов. При этом в ряде исследований [12–17] отмечено влияние лесотаксационных показателей, метеорологических условий, времени года на поток энергии ионизирующего излучения в лесных биогеоценозах, что существенно усложняет проведение расчетов внешнего облучения древесных растений.

Целью настоящего исследования стала разработка программного средства для оценки динамики мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения по высоте древостоев сосновых насаждений в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В состав программного средства входят четыре расчетных модуля по оценке:

- биометрических показателей древесных растений сосновых насаждений в зависимости от возраста и бонитета;
- плотности осаждения радионуклидов из состава аварийных выпадений на земную поверхность;
- динамики активности радионуклидов из состава выпадений в системе “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы”;
- динамики мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения по высоте древостоя сосновых насаждений в первый вегетационный сезон после аварийных радиоактивных выпадений.

При проведении расчетов были приняты следующие допущения.

В качестве модельных биогеоценозов выбраны сосновые насаждения, критерии их выбора – положение в системе (экологические), доступность для мониторинга, критические пути облучения (дозиметрические), радиочувствительность, способность вида к самовосстановлению [4, 5, 7, 12, 13].

Биометрические показатели древесных растений (высота, диаметр ствола на высоте 1.3 м, биомасса элементов надземной фитомассы) принимали неизменными в течение вегетационного периода и аппроксимировали параболической функцией в зависимости от возраста ( $A_g$ ) и бонитета насаждения [18]:

$$Y = a_0 + a_1 A_g + a_2 A_g^2 + a_3 A_g^3, \quad (1)$$

где  $Y$  – результирующий показатель;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – параметры;  $A_g$  – возраст деревьев, лет.

Взаимосвязь протяженности крон ( $l_k$ ) с высотами ( $H$ ) и диаметрами стволов ( $d$ ) представлена в виде [19]:

$$l_k = r_0 + r_1 d + r_2 H + r_3 d H, \quad (2)$$

где  $r_0, r_1, r_2, r_3$  – параметры;  $H$  – высота деревьев, м;  $d$  – диаметр ствола дерева на высоте груди, см.

Поступление радионуклидов в модельный биогеоценоз предполагали в результате аварийных радиоактивных выпадений. Плотность выпадений на земную поверхность  $i$ -го радионуклида на расстоянии  $x$  от источника выброса рассчитывали с помощью Гауссовой модели рассеяния радионуклидов в атмосфере для разовых выбросов [20]:

$$\sigma_i(x) = Q_i V_{g,i} G(x), \quad (3)$$

где  $Q_i$  – активность выброса, Бк;  $V_{g,i}$  – скорость гравитационного осаждения радионуклида, м/с;  $G(x)$  – фактор метеорологического разбавления на удалении  $x$  метров от источника выброса, с/м<sup>3</sup>.

Фактор метеорологического разбавления ( $G(x)$ ) рассчитывается на уровне подстилающей поверхности ( $z = 0$ ) на оси следа выпадений ( $y = 0$ ) [20]:

$$G(x) = \frac{f_p(x) f_{oc}(x) f_b(x)}{\pi \sigma_y(x) \sigma_z(x) u} e^{-\left(\frac{h^2}{2\sigma_z(x)}\right)}, \quad (4)$$

где  $h$  – высота выброса над земной поверхностью, м;  $\sigma_z(x), \sigma_y(x)$  – стандартные отклонения распределения примеси в облаке выброса в направлении соответствующих координатных осей, м [20];  $f_p(x), f_{oc}(x), f_b(x)$  – функции истончения струи за счет радиоактивного распада, сухого осаждения и влажного выведения из атмосферы на подстилающую поверхность [20].

В течение времени аварийного выброса и последующих 10 ч после его прекращения метеорологические (скорость и направление ветра на высоте флюгера, категорию устойчивости атмосферы) и радиологические (интенсивность, радионуклидный состав, формы нахождения радионуклидов) условия приняты неизменными.

В связи с вероятностным характером развития аварийной ситуации и повреждений технологического оборудования на предприятии, применяющем ядерные технологии, геометрическая высота выброса и его радионуклидный состав могут быть произвольными, но неизменными в течение времени моделирования выброса.

Скорость гравитационного (сухого) осаждения радионуклидов принята по умолчанию, скорость осаждения 0.008 м/с<sup>1</sup>.

Аэродинамическая шероховатость земной поверхности принимается постоянной в направлении движения облака аварийных радиоактивных выпадений. Предполагали, что на момент радиационной аварии могут быть любая категория устойчивости атмосферы (от А – предельно неустойчивая до Г – очень устойчивая) и скорость ветра на высоте флюгера [20].

При расчетах распространения радионуклидов относительно источника аварийного выброса учет атмосферных осадков не проводили [20]. Это связано с тем, что время с осадками в течение года относительно невелико по сравнению с его общей продолжительностью. Соответственно вероятность аварийного выброса в момент выпадения атмосферных осадков мала.

Поверхностное радиоактивное загрязнение наземной фитомассы древесных растений основных насаждений определяется задерживанием радионуклидов и дальнейшим их перераспределением между компартментами системы “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы”.

Активность  $i$ -го радионуклида на поверхности кроны древесного растения ( $\sigma_{\text{раст},i}$ ), произрастающего на единице площади почвы, рассчитывали на основе следующей зависимости [21]:

$$\sigma_{\text{раст},i}(t) = \sigma_i K_3 e^{(-\lambda_{\text{эфф},i} t)}, \quad (5)$$

где  $K_3$  – 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<sup>-1</sup>.

Динамику поверхностной активности  $i$ -го радионуклида в поверхностном слое почвы описывали формулой [21]:

$$\sigma_{\text{почв},i}(t) = \sigma_i e^{(-\lambda_{\text{расп},i} t)} (1 - K_3 e^{(-\lambda_{\text{очищ},i} t)}), \quad (6)$$

где  $\lambda_{\text{очищ}}$  – постоянная очищения, сут<sup>-1</sup>,  $\lambda_{\text{расп}}$  – константа радиоактивного распада, сут<sup>-1</sup>.

В формулах (5) и (6) постоянная очищения поверхности кроны ( $\lambda_{\text{очищ}}$ ) принята 0.0077 сут<sup>-1</sup> (90 сут) [21]. Коэффициент задерживания радиоактивных выпадений поверхностью кроны древесных растений ( $K_3$ ) задается пользователем. Его величина может быть принята равной коэффициенту сомкнутости крон.

Предполагали равномерное распределение радионуклидов по вертикальному профилю каждого компартмента системы. Процессами миграции радионуклидов в глубь вертикального профиля почвы в течение первого года после аварийных выпадений пренебрегали.

Мощность поглощенной дозы по высоте древостоя формируется от внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения радионуклидов, находящихся на поверхности кроны древесных растений и в поверхностном слое почвы. Геометрия данных источников излучения – бесконечно протяженный излучающий слой конечной толщины.

Расчет мощности поглощенной дозы  $\gamma$ -излучения (Гр/с) на расстоянии  $L$  (м) от источника излучения проводили путем интегрирования дозовой функции ослабления точечного источника с

учетом вклада рассеянного излучения посредством применения дозового фактора накопления [22]:

$$D_\gamma(L) = 1.602 \times 10^{-13} q \sum_{i=1}^h \left( \frac{v_i E_i n_i}{4\pi L^2} e^{-\mu_i s} B(\mu_i s, E_i) \right), \quad (7)$$

где  $k$  – количество линий спектра  $\gamma$ -излучения;  $q$  – активность источника, Бк (для единичной активности мощность поглощенной дозы является коэффициентом дозового преобразования);  $L$  – расстояние от источника до точки детектирования, м;  $E_i$  – энергия  $\gamma$ -линии спектра, МэВ;  $n_i$  – выход квантов  $i$ -й энергии спектра на распад, отн. ед.;  $s$  – массовая толщина поглотителя между источником и детектором, кг/м<sup>2</sup>;  $E_i$  –  $i$ -я энергия спектра излучения радионуклида, МэВ;  $v_i$ ,  $\mu_i$  – массовые коэффициенты поглощения и ослабления квантов  $i$ -й энергии в среде прохождения излучения, м<sup>2</sup>/кг;  $B(\mu_i s, E_i)$  – фактор накопления.

Расчет мощности поглощенной дозы  $\beta$ -излучения (Гр/с) на расстоянии  $L$  (см) проводили путем интегрирования дозовой функции от точечного источника излучения с единственным спектром [22]:

$$D_\beta(L) = \frac{1.6 \times 10^{-10} a_{21} q n_\beta \bar{E}_\beta}{4\pi L^2} \times \quad (8)$$

$$\times (A a_{21} \rho L e^{-v_1 a_{21} \rho L} + B \times e^{-v_2 a_{21} \rho L} + C e^{-v_3 a_{21} \rho L}),$$

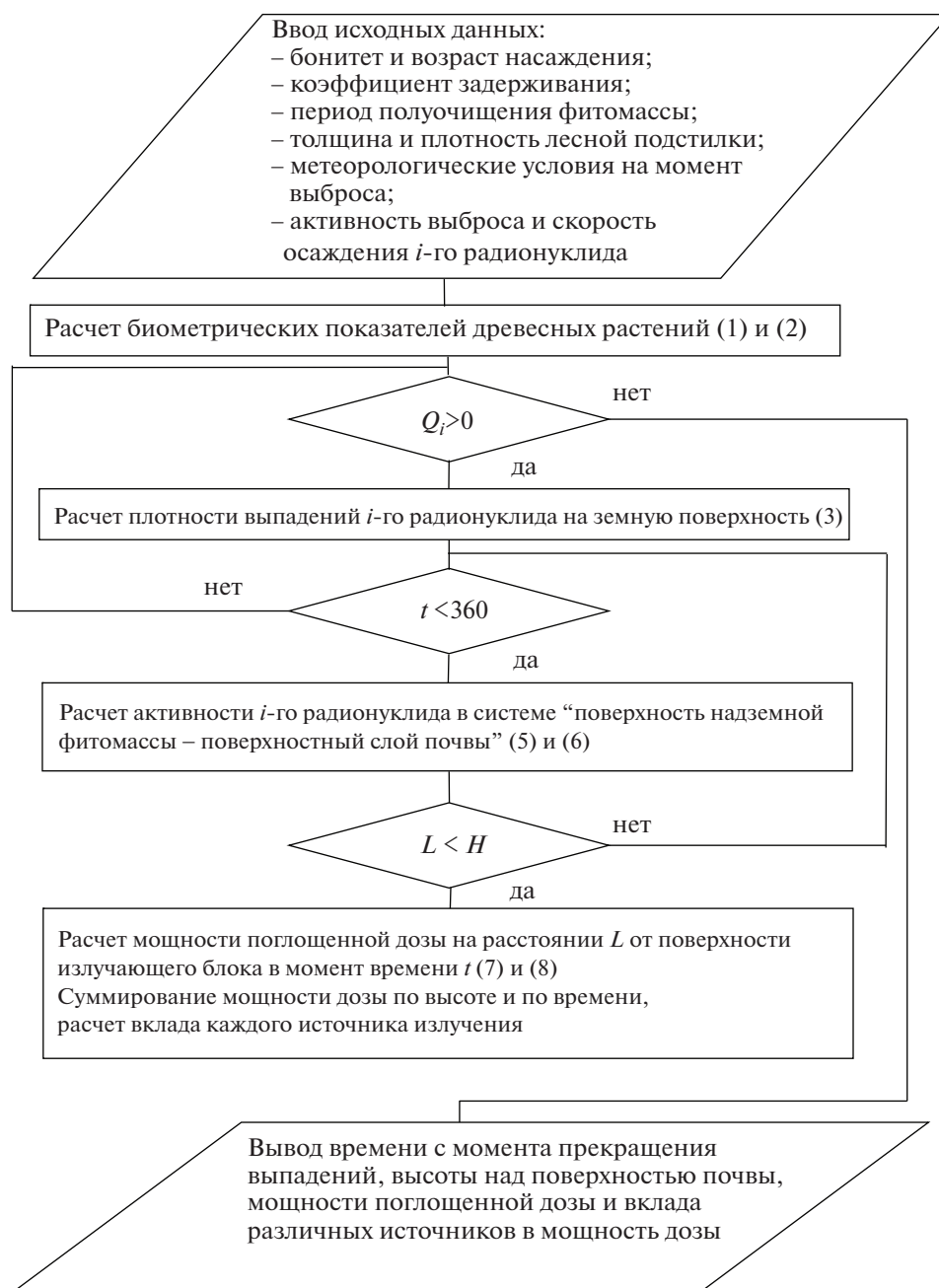
где  $a_{21}$  – коэффициент, учитывающий плотность среды, отличной от воды, принимается 0.89;  $n_\beta$  – выход  $\beta$ -частиц на распад, отн. ед.;  $\bar{E}_\beta$  – средняя энергия  $\beta$ -излучения, МэВ;  $\rho$  – плотность среды распространения, г/см<sup>3</sup>;  $A, B, C, v_1, v_2, v_3$  – безразмерные параметры, зависящие от максимальной энергии  $\beta$ -излучения. Значения параметров для разных энергетических диапазонов  $\beta$ -спектров приведены в [22].

Вывод расчетных формул для мощности поглощенной дозы  $\gamma$ -излучения с необходимыми пояснениями приведен в [17, 21],  $\beta$ -излучения – в [21].

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

При оценках мощности поглощенной дозы пренебрегали внешним  $\alpha$ -излучением в связи с его эффективным задерживанием поверхностным слоем кутикулы растений.

Модель динамики активности радионуклидов в системе “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы” и связанной с ней мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения по высоте древостоя охватывает только первый год после радиоактивных выпадений



**Рис. 1.** Алгоритм расчета динамики мощности поглощенной дозы  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения по высоте древостоя сосновых насаждений после аварийных радиоактивных выпадений.

**Fig. 1.** Algorithm for calculating the dynamics of absorbed dose rate of  $\beta$ - and  $\gamma$ -radiation by the height of pine stands in case of accidental radioactive releases.

ний, когда происходят процессы поверхностного очищения надземной фитомассы. Процессами внекорневого и корневого поступления радионуклидов в растения в этот период можно пренебречь [9, 11, 13].

Оценка мощности поглощенной дозы от внутреннего облучения древесных растений в модели не рассматривалась.

На основе принятых допущений и математических формул (1–8) построен алгоритм расчета

динамики мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения по высоте древостоя после аварийных радиоактивных выбросов (рис. 1) и разработано программное средство.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Интерфейс программного средства условно можно разделить на две части. В левой части осу-

ществляется ввод пользователем основных характеристик:

- соснового насаждения (возраст и бонитет, коэффициент задерживания радионуклидов и период полураспада наземной фитомассы);

- поверхностного слоя почвы (линейная толщина и плотность);

- условий радиоактивного выброса (высота, продолжительность, расстояние от источника выброса, для которого осуществляется расчет динамики мощности поглощенной дозы, категория устойчивости атмосферы и аэродинамическая шероховатость поверхности).

При этом используется предопределенный набор входных данных и условий выброса, однако можно их корректировать в соответствии с имеющейся информацией. Так, в зависимости от заданного возраста и бонитета древостоя автоматически вычисляются таксационные характеристики насаждения (высота деревьев, длина кроны и ее биомасса), при этом они могут быть скорректированы пользователем.

Предоставлена возможность выбора одной из шести категорий устойчивости атмосферы по Пасквиллу: от предельно неустойчивой с развитой конвекцией (А) до очень устойчивого состояния (G) [20].

Аэродинамическая шероховатость земной поверхности также может быть выбрана из четырех предопределенных в программном средстве величин: от 10 см, соответствующей открытым и ровным участкам земной поверхности до 400 см, соответствующей пересеченной местности [20].

Правая часть интерфейса программного средства содержит одну вкладку для ввода исходных данных по активности радионуклидов в составе выброса и их скорости гравитационного осаждения, а также ряд вкладок для вывода результатов расчета в табличной форме.

Ввод значения активности разового выброса в таблице осуществляется напротив соответствующего радионуклида, при этом пользователь может изменить скорость гравитационного осаждения. Энергетические характеристики радионуклидов (энергия МэВ на распад по  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучениям, дифференциальная  $\gamma$ -постоянная для  $\gamma$ -квантов, средняя и максимальная энергия  $\beta$ -излучения, выход на распад  $\gamma$ -квантов) прописаны в библиотеке программного средства, подготовленной согласно [23], и применяются при расчетах дозовых показателей в соответствии с формулами (8–9). В правой части интерфейса программного средства пользователь осуществляет выбор показателя по величинам мощности дозы для сводной таблицы, по умолчанию установлен показатель суммарной мощности дозы (рис. 2).

Результаты расчетов отражены на вкладках “Показатели осаждения”, “Распределение мощности дозы”, “Динамика мощности дозы” и “Динамика радиационного показателя” (рис. 2).

Вкладка “Показатели осаждения” содержит информацию по интегральной и осредненной объемной активности радионуклидов в облаке аварийного выброса, а также плотности выпадений на земную поверхность для каждого из радионуклидов со скоростью гравитационного осаждения, отличной от нуля (рис. 3).

На вкладке “Распределение мощности дозы” отображаются результаты расчета мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения по высоте древостоя от излучения радионуклидов, находящихся на поверхности почвы и кроны для произвольного момента времени от окончания радиоактивных выпадений. На данной вкладке приводится оценка вклада каждого из источников в суммарную расчетную мощность поглощенной дозы (рис. 4).

Вкладка “Динамика мощности дозы” программного средства отображает динамику мощности поглощенной дозы, вклад видов и источников излучения по высоте сосновых насаждений в течение первого года после радиоактивных выпадений (рис. 5).

Вкладка “Динамика радиационного показателя” предоставляет пользователю информацию об изменении выбранного пользователем дозиметрического показателя по высоте древостоя в течение года после прекращения радиоактивных выпадений.

С применением разработанного программного средства выполнен расчет динамики мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения по высоте древостоя после аварийных радиоактивных выбросов на примере 30-летнего соснового насаждения II класса бонитета. Исходные данные отражены на рис. 2.

Прогнозируемая суммарная мощность поглощенной дозы на 1-е сутки после выпадений неравномерно распределена по высоте древостоя. У поверхности почвы она составляет ~2000 мкГр/сут, при этом 80% мощности дозы формирует внешнее  $\beta$ -излучение (рис. 4). С увеличением высоты от поверхности почвы к середине подкروнового пространства мощность поглощенной дозы снижается до 600 мкГр/сут. Она формируется, в основном, за счет  $\gamma$ -излучения радионуклидов, задержанных кроной древесных растений (~40%) и находящихся на поверхности почвы (30%). В середине кроны мощность поглощенной дозы достигает 1240 мкГр/сут и определяется излучением радионуклидов, задержанных поверхностью наземной фитомассы деревьев, при этом ~60% дозового показателя формирует  $\beta$ - и около 20% –  $\gamma$ -излучение (рис. 4).

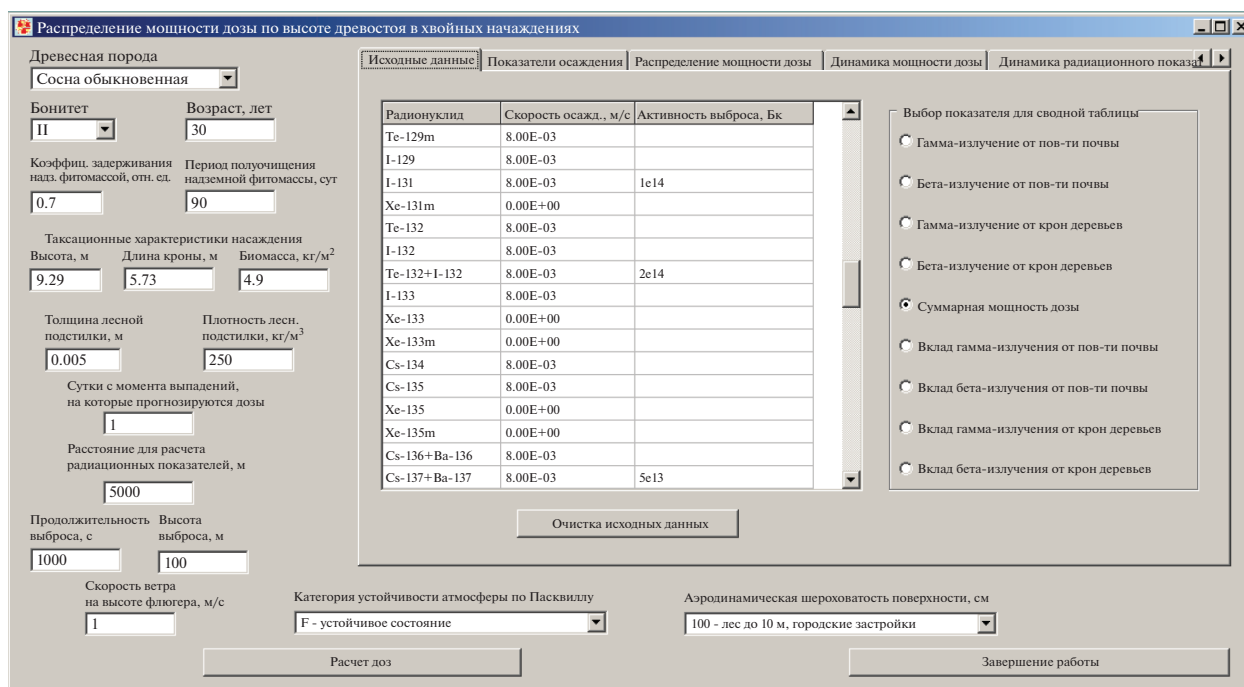


Рис. 2. Интерфейс главного окна программного средства.

Fig. 2. Interface of the main window of the software tool.

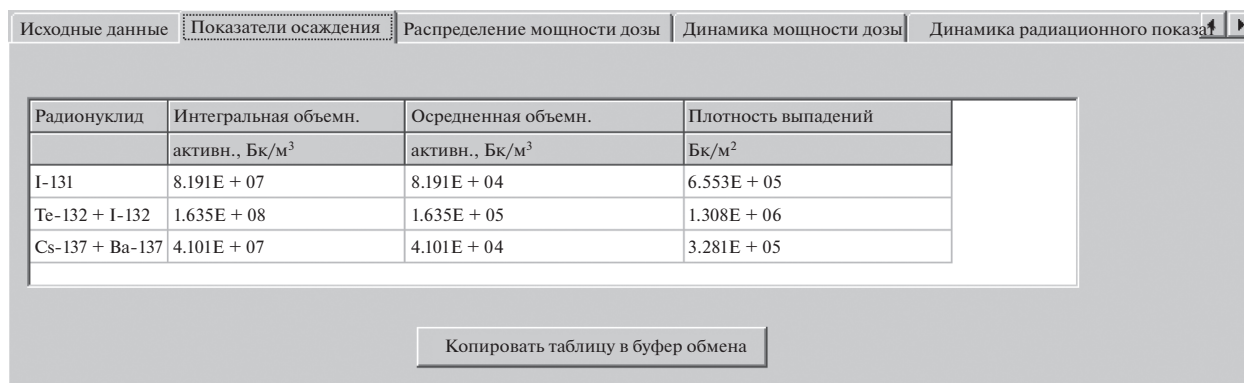


Рис. 3. Вывод данных по объемной активности и плотности выпадений радионуклидов на вкладке “Показатели осадения”.

Fig. 3. Output of data on the volume activity and density of radionuclide deposition on “Deposition indicators” tab.

Оценка вклада разных видов и источников ионизирующего излучения в мощность поглощенной дозы в кроне дерева на 1-е и 360-е сутки после радиоактивных выпадений приведена на рис. 5. На первые сутки после радиоактивных выпадений основным источником облучения кроны служит  $\beta$ -излучение радионуклидов, находящихся на ее поверхности. В дальнейшем вклад этого источника снижается и определяющую роль играет  $\gamma$ -излучение от поверхности почвы.

За первый год после радиоактивных выпадений ожидается неравномерное снижение мощно-

сти поглощенной дозы по высоте кроны древесных растений: в 3–10 раз у поверхности почвы, до 30 раз в середине подкоронового пространства и до 70 – в середине кроны (рис. 6). Это связано с радиоактивным распадом короткоживущих  $^{132}\text{I} + ^{132}\text{Te}$  и  $^{131}\text{I}$ , а также с поверхностным очищением кроны древесных растений.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее программное средство позволяет прогнозировать динамику мощности поглощен-



Рис. 4. Вывод данных по распределению мощности поглощенной дозы внешнего β- и γ-излучения по высоте дерева на вкладке “Распределение мощности дозы”.

Fig. 4. Output of data on the distribution of absorbed dose rate of external β- and γ-radiation by height of stand on the “Dose rate distribution” tab”.

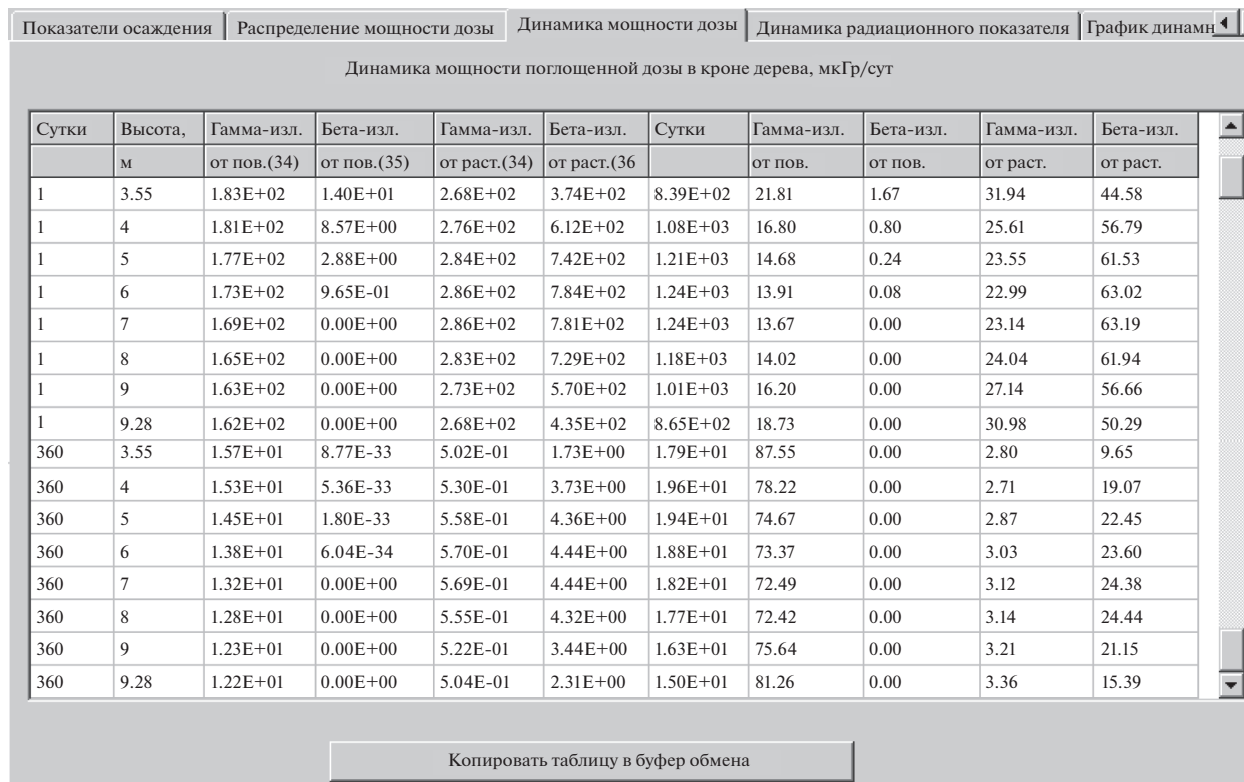


Рис. 5. Вывод данных по динамике мощности поглощенной дозы в кроне деревьев на вкладке “Динамика мощности дозы”.

Fig. 5. Output of data on the dynamics of absorbed dose rate in tree crown on “Dose rate dynamics” tab.

Суммарная мощность дозы, мкГр/сут										
Высота, м	1 сутки	2 сутки	3 сутки	10 сутки	15 сутки	30 сутки	45 сутки	60 сутки	90 сутки	360 сутки
0.05	2.19E+03	1.91E+03	1.29E+03	7.82E+02	5.67E+02	4.05E+02	4.03E+02	4.28E+02	4.89E+02	7.03E+02
0.5	9.66E+02	8.05E+02	4.79E+02	2.28E+02	1.36E+02	8.73E+02	8.98E+01	9.66E+01	1.10E+02	1.55E+02
1	7.26E+02	5.98E+02	3.35E+02	1.40E+02	6.99E+01	3.32E+01	3.30E+01	3.50E+01	3.90E+01	5.20E+01
1.5	6.40E+02	5.22E+02	2.89E+02	1.15E+02	5.37E+01	2.09E+01	1.95E+01	2.02E+01	2.15E+01	2.65E+01
2	6.13E+02	5.01E+02	2.75E+02	1.09E+02	5.00E+01	1.84E+01	1.67E+01	1.67E+01	1.74E+01	1.99E+01
3	6.86E+02	5.59E+02	3.08E+02	1.24E+02	6.00E+01	2.43E+01	2.13E+01	2.05E+01	1.97E+01	1.72E+01
3.55	8.39E+02	6.91E+02	3.91E+02	1.71E+02	9.09E+01	4.21E+01	3.54E+01	3.25E+01	2.90E+01	1.79E+01
4	1.08E+03	8.94E+02	5.25E+02	2.50E+02	1.45E+02	7.29E+01	5.97E+01	5.35E+01	4.53E+01	1.96E+01
5	1.21E+03	9.98E+02	5.88E+02	2.77E+02	1.61E+02	8.18E+01	6.70E+01	5.97E+01	5.00E+01	1.94E+01
6	1.24E+03	1.03E+03	6.04E+02	2.82E+02	1.64E+02	8.28E+01	6.77E+01	6.03E+01	5.04E+01	1.88E+01
7	1.24E+03	1.02E+03	6.01E+02	2.82E+02	1.63E+02	8.24E+01	6.73E+01	5.99E+01	4.99E+01	1.82E+01
8	1.18E+03	9.76E+02	5.74E+02	2.71E+02	1.58E+02	8.03E+01	6.56E+01	5.83E+01	4.85E+01	1.77E+01
9	1.01E+03	8.34E+02	4.90E+02	2.31E+02	1.34E+02	6.70E+01	5.45E+01	4.85E+01	4.08E+01	1.63E+01
9.28	8.65E+02	7.13E+02	4.10E+02	1.85E+02	1.03E+02	4.92E+01	4.05E+01	4.65E+01	3.13E+01	1.50E+01

**Рис. 6.** Вывод данных по динамике мощности поглощенной дозы в кроне деревьев на вкладке “Динамика мощности дозы”.

**Fig. 6.** Output of data on the dynamics of the absorbed dose rate in tree crown on “Dose rate dynamics” tab.

ной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения по высоте сосновых насаждений после аварийных радиоактивных выпадений. Исходными данными для проведения расчетов являются биометрические показатели древесных растений в зависимости от возраста и бонитета, плотность осаждения радионуклидов на земную поверхность и динамика их перераспределения в системе “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы” в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений.

Специфичность объекта исследований определяется высокой задерживающей способностью поверхности крон деревьев по отношению к аэральным радиоактивным выпадениям (до 95%) при относительно низкой интенсивности очищения ( $0.0021-0.033 \text{ сут}^{-1}$ ) [11, 13]. При этом происходит формирование длительно действующих объемных источников ионизирующего излучения [9]. Показано, что в течение первого месяца после аварийных радиоактивных выпадений ЧАЭС до 80% дозы внешнего облучения было накоплено надземной фитомассой древесных растений, при этом 90% дозы было обусловлено  $\beta$ -излучением и только 10% –  $\gamma$ -излучением [24–26]. Соответственно, в этих условиях модельное представление о формировании дозы внешнего облучения по высоте древостоя от  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений радионуклидов, задержанных поверхностью кроны древесных растений и поверхностным слоем почвы в

виде бесконечно протяженных в продольном направлении блоков конечной толщины, вполне закономерно.

При соблюдении условия эквивалентности дозы оценка внешнего облучения генеративных и репродуктивных органов сосны обыкновенной может быть выполнена исходя из рассчитанной мощности в гомогенной воздушно-растительной среде крон древесных растений. В то же время для оценки дозы от внешнего  $\beta$ -излучения необходимо введение специальных поправок, учитывающих экранирование  $\beta$ -частиц поверхностными тканями [22]. В настоящее время разработан целый ряд программных средств для оценки доз облучения живых организмов FASSET-ERICA [27], EPIC [28], RESRAD-BIOTA [29], EDEN [30], ERICA Tool (version 1.2) [31], BiotaDC [32]. Они базируются на применении специфичных для каждого радионуклида и облучаемого организма коэффициентах дозового преобразования. В указанных программных средствах рассматривается формирование дозы внешнего и внутреннего облучения древесного растения, представленного в виде эллипсоида [4]. Однако исходные данные по активности радионуклидов в поверхностном слое почвы для оценки внешнего и в древесине для внутреннего облучения задаются пользователем точно при неизменных биометрических показателях древесных растений и условия квазиравновесного распределения радионуклидов между



компартаментами системы. Кроме того, данные программные средства не позволяют корректно оценить внешнюю дозу облучения древесных растений при преобладании поверхностного радиоактивного загрязнения в первые месяцы после аварийных радиоактивных выпадений. В них отсутствует дозиметрическая модель облучения основных точек роста и генеративных органов [4].

Таким образом, разработанное программное средство позволяет оценить динамику дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения древесных растений в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений с учетом перераспределения в системе “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы”. Соответственно это обуславливает получение новых знаний о формировании радиационного воздействия на древесные растения сосны обыкновенной в первый временной период после аварийных радиоактивных выпадений, что является основой для прогнозирования возникновения в них радиационно-индуцированных эффектов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано программное средство для оценки динамики мощности поглощенной дозы внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучения по высоте древостоя сосновых насаждений в течение первого года после аварийных радиоактивных выпадений. Программное средство включает в себя четыре расчетных модуля по оценке: биометрических показателей древесных растений сосновых насаждений в зависимости от возраста и бонитета, плотности осадения радионуклидов из состава аварийных выпадений на земную поверхность, динамики активности радионуклидов в системе “поверхность кроны древесных растений – поверхностный слой почвы”, динамики мощности поглощенной дозы по высоте древостоя в сосновых насаждениях.

Результаты прогнозирования динамики мощности поглощенной дозы, полученные с применением разработанного программного средства, могут служить основой для проведения экспресс-оценок радиационного воздействия в первый год после аварийных радиоактивных выпадений.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФ № 21-16-00004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ICRP 2002. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species. ICRP Publication 91 // Ann. ICRP. 2002. 33. № 3. 74 p.
2. Department of Energy. A Graded Approach for Evaluating Radiation Doses to Aquatic and Terrestrial Biota /

DOE-STD-1153-2002. Dept. Energy. Washington: D.C., 2002. 234 p.

3. *Beaugelin-Seiller K., Jasserand F., Garnier-Laplace J., Garie J.C.* Modeling radiological dose in non-human species: principles, computerization, and application // Health Phys. 2006. V. 90. № 5. P. 485–493.
4. ICRP 2008. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108 // Ann. ICRP. 2008. 38 (4–6). 245 p.
5. Modeling radiation exposure and radionuclide transfer for non-human species // Report of the Biota Working Group of EMRAS. Theme 3. Vienna: IAEA, 2010. 244 p.
6. ICRP 2017. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. ICRP Publication 136 // Ann. ICRP. 2017. 46. № 2. 136 p.
7. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту / Под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: ООО Сам Полиграфист, 2015. 265 с. [Prakticheskiye rekomendatsii po voprosam otsenki radiatsionnogo vozdeystviya na cheloveka i biotu / Pod obshch. red. I.I. Linge i I.I. Krysheva, M.: ООО Sam Poligrafist, 2015. 265 s. (In Russ.)]
8. *Спирин Е.В.* Современные проблемы экологической дозиметрии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49. № 3. С. 338–345. [*Spirin E.V.* Modern problems of ecological dosimetry // Radiats. Radioecology. 2009. V. 49. № 3. P. 338–345 (In Russ.)]
9. *Криволюцкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А. и др.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Наука, 1988. 240 с. [*Krivilutskiy D.A., Tikhomirov F.A., Fedorov E.A. i dr.* Deystviye ioniziruyushchey radiatsii na biogeotsenoz. M.: Nauka, 1988. 240 s. (In Russ.)]
10. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территорий продуктами деления урана / Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с. [Itogi izucheniya i opyt likvidatsii posledstviy avariynogo zagryazneniya territoriy produktami deleniya urana / Pod red. A.I. Burnazyana. M.: Energoatomizdat, 1990. 144 s. (In Russ.)]
11. 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. [Radioaktivnoye zagryazneniye territorii Belarusi (v svyazi s avariyei na ChAES) / Pod red. V.I. Parfenova i B.I. Yakusheva. Minsk: Nauka i tekhnika, 1995. 582 s. (In Russ./)]
12. *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. [*Abaturov Yu.D., Abaturov A.V., Bykov A.V. i dr.* Vliyanie ioniziruyushchego izlucheniya na sosnovyye lesa v blizhney zone Chernobylskoy AES. M.: Nauka, 1996. 240 s. (In Russ.)]
13. *Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы (1986–2001 гг.). М.: ИПЦ Дизайн. Информация. Картография, 2002. 272 с. [*Kozubov G.M.,*

- Taskayev A.I.* Radiobiologicheskiye issledovaniya khvoynykh v rayone Chernobylskoy katastrofy (1986–2001 gg.). M.: IPTs Dizayn. Informatsiya. Kartografiya, 2002. 272 s. (In Russ.)]
14. *Израэль Ю.А., Стукин Е.Д.* Гамма-излучение радиоактивных выпадений. М.: Атомиздат, 1967. 224 с. [*Izrael Yu.A., Stukin E.D.* Gamma-izlucheniye radioaktivnykh vyapadeniy. M.: Atomizdat, 1967. 224 s. (In Russ.)]
  15. *Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.* Основы гамма-спектрометрии природных сред. М.: Атомиздат, 1976. 368 с. [*Kogan R.M., Nazarov I.M., Fridman Sh.D.* Osnovy gamma-spektrometrii prirodnykh sred. M.: Atomizdat, 1976. 368 s. (In Russ.)]
  16. *Алексахин Р.М., Болтнева Л.И., Назаров И.М.* К характеристике гамма-поля радиоактивных выпадений в лесу // Лесоведение. 1972. № 1. С. 35–42. [*Alexakhin R.M., Boltneva L.I., Nazarov I.M.* K kharakteristike gamma-polya radioaktivnykh vyapadeniy v lesu // Lesovedeniye. 1972. № 1. S. 35–42. (In Russ.)]
  17. *Спиридонов 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. [*Spiridonov S.I., Fesenko S.V., Geras'kin S.A. i dr.* Otsenka doz oblucheniya drevesnykh rasteniy v otdalennyy period posle avarii na Chernobylskoy AES // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2008. T. 48. № 4. S. 443–449. (In Russ.)]
  18. *Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Nilsson S., and Buluy Yu.I.* Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of northern Eurasia (standard and reference materials). Moscow, 2008. 886 p.
  19. *Атрошченко О.А.* Лесная таксация. Минск: БГТУ, 2009. 466 с. [*Atroshchenko O.A.* Lesnaya taksatsiya. Minsk: BGTU, 2009. 466 s. (In Russ.)]
  20. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (МПА-98). М.: Минатом России, 1999. 127 с. [Metodicheskiye ukazaniya po raschetu radiatsionnoy obstanovki v okruzhayushchey srede i ozhidayemogo oblucheniya naseleniya pri kratkovremennykh vybrosakh radioaktivnykh veshchestv v atmosferu (MPA-98). Moskva: Minatom Rossii, 1999. 127 s. (In Russ.)]
  21. *Переволоцкий А.Н., Спиринов Е.В., Переволоцкая Т.В., Спиридонов С.И.* Модель расчета мощности поглощенной дозы в вертикальном профиле почвы в острую фазу радиоактивных выпадений // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58. № 4. С. 415–424. [*Perevolotskiy A.N., Spirin E.V., Perevolotskaya T.V., Spiridonov S.I.* Model rascheta moshchnosti pogloshchennoy dozy v vertikalnom profile pochvy v ostruyu fazu radioaktivnykh vyapadeniy // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2018. V. 58. № 4. S. 415–424. (In Russ.)]
  22. *Спиринов Е.В.* Методические указания по оценке доз облучения компонентов агроэкосистем. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2014. 22 с. [*Spirin E.V.* Metodicheskiye ukazaniya po otsenke doz oblucheniya komponentov agroekosistem. Obninsk: FGBNU VNIIRAE, 2014. 22 s. (In Russ.)]
  23. ICRP 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38. № 3. 2008. 93 p.
  24. *Пристер В.С., Ткаченко Н.В.* Распределение гамма-излучающих радионуклидов по различным компонентам хвойного леса в течение двух лет после радиоактивного загрязнения // I Всесоюз. радиобиол. съезд: Тез. докл., 21–27 августа 1989 г. М., 1989. С. 100. [*Prister V.S., Tkachenko N.V.* Raspredele-niye gamma-izluchayushchikh radionuklidov po razlichnym komponentam khvoynogo lesa v techenie 2-kh let posle radioaktivnogo zagryazneniya // I Vsesoyuznyy radiobiologicheskiy syezd: Tezisy dokl., 21–27 avgusta 1989 g. Moskva, 1989. S. 100. (In Russ.)]
  25. *Тихомиров Ф.А., Сидоров В.П.* Радиационные повреждения леса в зоне ЧАЭС // Биологические и радиоэкологические аспекты аварии на ЧАЭС: Материалы I Междунар. конф., 10–18 сентября 1990 г. М., 1990. С. 18. [*Tikhomirov F.A., Sidopov V.P.* Padiatsionnye povpezhdeniya leca v zone ChAEC // Biologicheskie i radioekologicheskie aspekty avarii na ChAEC: materialy I Mezhdunar. konf., 10–18 sentyabrya 1990 g. Moskva, 1990. S. 18. (In Russ.)]
  26. *Ушаков Б.А., Панфилов А.В., Василенко А.А.* Радиоактивное загрязнение лесов Брянской области // Лесное хозяйство. 1992. № 1. С. 29–30. [*Ushakov B.A., Panfilov A.V., Vasilenko A.A.* Radioaktivnoye zagryazneniye lesov Bryanskoj oblasti // Lesnoye khozyaystvo. 1992. № 1. С. 29–30. (In Russ.)]
  27. *Larsson C.M.* An overview of the ERICA integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing radiation // J. Environ. Radioact. 2008. V. 99. P. 1364–1370.
  28. *Golikov V., Brown J.* Internal and External Dose Models – a Deliverable Report for EPIC (Environmental Protection from Ionising Contaminants in the Arctic) / Contract EU: ICA2-CT-2000-10031 NRPA. Oslo, Norway, 2003. 35 p.
  29. Department of Energy. A Graded Approach for Evaluating Radiation Doses to Aquatic and Terrestrial Biota / DOE-STD-1153-2002. Dept. Energy. Washington, D.C., 2002. 234 p.
  30. *Beaugelin-Seiller K., Jasserand F., Garnier-Laplace J., Garie J.C.* Modeling radiological dose in non-human species: principles, computerization, and application // Health Phys. 2006. V. 90. № 5. P. 485–493.
  31. *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. Radioact. 2016. V.153. P. 141–148.
  32. *Ulanovsky A.* Absorbed doses in tissue-equivalent spheres above radioactive sources in soil // Radiat. Environ. Biophys. 2014. V. 53. P. 729–737.

## Software Tool for Estimating the Absorbed Dose Rate in Pine Stands in Case of Accidental Radioactive Fallout

T. V. Perevolotskaya<sup>a</sup>, A. N. Perevolotsky<sup>a</sup>, and S. A. Geras'kin<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup>*Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: stgeraskin@gmail.com*

The article presents the results of development of a software tool for assessing the dynamics of absorbed dose rate of external  $\beta$ - and  $\gamma$ -radiation by the height of the pine stands during first year after the accidental radioactive fallout, taking into account dynamics of their redistribution between compartments of the system “crown surface of woody plants – surface layer of soil”. The main assumptions of the software implementation using mathematical modeling methods are formulated. The estimation of radionuclide deposition on the Earth's surface is based on the Gaussian model of atmospheric diffusion. The model (compartment) approach to the dynamics of redistribution of radionuclide activity from the composition of radioactive emissions is represented by a system of linear differential equations of first order. The calculation of absorbed dose rate is based on the integration of dose attenuation function of point source, taking into account the dose factor of accumulation of scattered radiation. The determining contribution of  $\beta$ -radiation from radionuclides located on surface of studied components of system is established. The developed software tool can be used for preliminary assessment of external  $\beta$ - and  $\gamma$ -radiation doses by the height of pine stands during first year after accidental radioactive fallout.

**Keywords:** radioactivity, crown surface of woody plants, surface layer of soil, radionuclides,  $\beta$ -radiation,  $\gamma$ -radiation, accidental radioactive fallout, absorbed dose rate, pine stands, emergency release