

DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-3-75-89

## Программное средство для оценки доз облучения референтных организмов при хронических радиоактивных выпадениях

Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., Спиридонов С.И.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, Обнинск

Подготовлена методика оценки мощности поглощённой дозы для референтных организмов сухопутных биогеоценозов при хронических радиоактивных выпадениях. В среде программирования Lazarus на языке Object Pascal разработано программное средство с набором библиотек коэффициентов дозового преобразования для оценки мощности поглощённой дозы референтных организмов на различном расстоянии от источника хронических радиоактивных выбросов. Проведена верификация программного средства, результаты которой свидетельствуют о сопоставимых расчётных величинах среднесуточных факторов метеоразбавления с литературными данными и дозовых показателей с расчётными значениями, полученными с применением программы Erica Assessment Tool. Показано, что на удалении более 6000 м от источника выбросов различия между вариантами расчётов показателей радиоактивного загрязнения и доз облучения биоты становятся незначимыми. Описаны основные программные модули, применённые для расчёта мощности поглощённой дозы референтных организмов. Предложены дальнейшие пути развития программных средств для оценки доз облучения биоты. Программное средство может быть применено при оценке доз облучения и радиационного воздействия на биоту сухопутных биогеоценозов в зоне расположения предприятий ядерного топливного цикла.

**Ключевые слова:** облучение, радиоактивные выпадения, предприятия ядерного топливного цикла, референтные организмы, сухопутные биогеоценозы, мощность поглощённой дозы, коэффициенты дозового преобразования, модель рассеивания, фактор метеоразбавления, плотность выпадений, коэффициент задерживания, постоянная очищения.

### Введение

Одной из важнейших составляющих безопасного использования ядерной энергетики является обеспечение радиационной безопасности окружающей среды [1-5]. Успешное решение данной проблемы определяется разработкой моделей и программных средств количественной оценки радиационного воздействия на живые организмы, имеющих важное научно-практическое значение при разработке оценок воздействия проектируемых предприятий ядерного топливного цикла на природную среду.

К настоящему времени накоплен обширный материал по методическим аспектам оценки доз облучения биоты [3, 5-7], в том числе, разработаны соответствующие программные комплексы, в частности, в Erica Assessment Tool пользователь имеет возможность рассчитать величину дозы облучения референтного организма биоты с учётом статистических закономерностей распределения показателей радиоактивного загрязнения [8]. Однако, одним из ограничений Erica Assessment Tool является «точечная» оценка доз облучения биоты: пользователь вводит величину удельной активности радионуклида в почве, относительно которой и рассчитывается величина мощности поглощённой дозы для выбранных референтных организмов.

Переволоцкая Т.В.\* – ст. научн. сотр., к.б.н.; Переволоцкий А.Н. – вед. научн. сотр., д.б.н.; Спиридонов С.И. – зав. лаб., д.б.н., проф. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

\*Контакты: 249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км. Тел.: (484) 399-69-59; e-mail: riar@mail.ru.

Разработка программного средства, позволяющего рассчитать мощность поглощённой дозы для выбранного пользователем референтного организма в зависимости от расстояния до источника выбросов, представляет, на наш взгляд, несомненный научно-практический интерес.

### Материалы и методы

Объектами исследований при оценке радиационного воздействия на биоту послужили референтные животные (мелкие млекопитающие – мышь и заяц, крупные млекопитающие – козуля и олень, представители почвенной биоты) и растения (луговые травы и сосна обыкновенная) [5, 7].

Модельные расчёты доз облучения референтных организмов базируются на применении коэффициентов дозового преобразования, представляющих собой соотношение мощности поглощённой дозы референтного организма к концентрации радионуклида внутри организма или во внешней среде (мкГр/сут)/(Бк/кг или м<sup>2</sup>) [3, 5, 7].

**Оценка доз на референтные виды растений** определяется исходя из активности радионуклидов, распределённой на поверхности почвы и в воздушно-растительной среде (ВРС) лесного или лугового фитоценоза. Для *i*-го радионуклида динамика мощности поглощённой дозы ( $P_{общ,i}$ , мкГр/сут) может быть выражена следующим образом:

$$P_{общ,i}(t) = КДП_{внеш,i}^{почва} \cdot \sigma_{почва,i}(t) + КДП_{внеш,i}^{раст} \cdot C_{раст,i}(t), \quad (1)$$

где  $КДП_{внеш,i}^{почва}$  – коэффициент дозового преобразования для внешнего облучения от *i*-го радионуклида в почве, (мкГр/сут)/(Бк/м<sup>2</sup>) [3, 5, 7];  $\sigma_{почва,i}(t)$  – плотность загрязнения почвы *i*-м радионуклидом, Бк/м<sup>2</sup>;  $КДП_{внеш,i}^{раст}$  – коэффициент дозового преобразования для облучения от *i*-го радионуклида, находящегося в ВРС, (мкГр/сут)/(Бк/кг) [3, 5, 7];  $C_{раст,i}(t)$  – удельная активность *i*-го радионуклида в ВРС, Бк/кг.

Плотность загрязнения почвы на момент времени *t* (лет) с начала хронических радиоактивных выпадений при известной величине осадения *i*-го радионуклида за год ( $\sigma_{вып,i}$ , Бк/м<sup>2</sup>) и величине очищения корнеобитаемого слоя почвы за счёт радиоактивного распада ( $\lambda_{расп}$ ) может быть описана следующей зависимостью:

$$\sigma_{почва,i}(t) = \sigma_{вып,i} \cdot \frac{1 - e^{(-\lambda_{расп,i} \cdot t)}}{\lambda_{расп,i}}. \quad (2)$$

Удельная активность радионуклидов в растениях при их хроническом поступлении в окружающую среду определяется внекорневым поступлением радионуклидов на поверхность растений и корневым поступлением из почвы:

$$C_{раст,i}(t) = C_{раст,i}^{внекорн}(t) + C_{раст,i}^{корнев}(t). \quad (3)$$

Величина удельной активности ВРС при внекорневом загрязнении по истечении определённого времени с момента радиоактивных выпадений может быть оценена из установленных с помощью системы дифференциальных уравнений соотношений содержания радионуклида в почве и растительности [9, 10]:

$$C_{раст, i}^{внекорн} (t) = \sigma_{почв, i}^{табл} (t) \frac{C_{раст, i}^{табл}}{\sigma_{почв, i}^{табл}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{почв, i}^{табл}$  – табличное значение плотности загрязнения почвы  $i$ -м радионуклидом, Бк/м<sup>2</sup>;

$C_{раст, i}^{табл}$  – табличное значение удельной активности  $i$ -го радионуклида в ВРС (луговых трав или сосны), Бк/кг.

Корневое радиоактивное загрязнение рассчитывали исходя из известных величин коэффициентов накопления  $i$ -го радионуклида из почвы референтными растениями, при этом его удельная активность в ВРС:

$$C_{раст, i}^{корнев} (t) = \frac{\sigma_{почв, i} (t)}{\rho_{почв} \cdot h} \cdot KN_{почв-раст, i} \cdot \frac{\rho_{раст}}{\rho_{возд-раст}}, \quad (5)$$

где  $KN_{почв-раст, i}$  – коэффициент накопления  $i$ -го радионуклида в системе «почва-растение», ((Бк/кг в растении)/(Бк/кг почвы)) [6, 7];  $\rho_{почв}$  – плотность корнеобитаемого слоя почвы (1400 кг/м<sup>3</sup>);  $h$  – толщина корнеобитаемого слоя почвы (0,1 м);  $\rho_{раст}$  – биомасса растения, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> земной поверхности (принимается 0,5 кг/м<sup>2</sup> для трав и 7 кг/м<sup>2</sup> для леса);  $\rho_{возд-раст}$  – масса воздушно-растительной среды, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> земной поверхности (принимается 0,7 кг/м<sup>2</sup> для трав и 24 кг/м<sup>2</sup> для леса) [7].

**Оценка доз облучения референтных видов наземных животных** определяется исходя из активности радионуклидов, распределённой на поверхности почвы и поступившей внутрь организма животных. Для  $i$ -го радионуклида мощность поглощённой дозы может быть выражена как сумма мощностей доз внешнего и внутреннего облучения следующим образом:

$$P_{общ, i} (t) = KДП_{внеш, i}^{почва} \cdot \sigma_{почва, i} (t) + KДП_{внутр, i} \cdot C_{животн, i} (t), \quad (6)$$

где  $KДП_{внеш, i}^{почва}$  и  $KДП_{внутр, i}$  – коэффициенты дозового преобразования для внешнего облучения от поверхности почвы и внутреннего облучения референтного организма от  $i$ -го радионуклида, (мкГр/сут)/(Бк/м<sup>2</sup>) и (мкГр/сут)/(Бк/кг), соответственно [3, 5, 7];  $\sigma_{почва, i} (t)$  – плотность загрязнения почвы  $i$ -м радионуклидом, Бк/м<sup>2</sup>;  $C_{животн, i} (t)$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в организме животного, Бк/кг.

Удельную активность радионуклида в организме животных рассчитывали по следующей формуле, при этом плотность загрязнения почвы определена по формуле [2]:

$$C_{животн, i} (t) = \frac{\sigma_{почв, i} (t)}{\rho_{почв} \cdot h} \cdot KN_{почв-животн, i}. \quad (7)$$

Коэффициент накопления в системе «почва-животное»  $KN_{почв-животн, i}$  для  $i$ -го радионуклида принимали в соответствии с [6, 7].

Мощность поглощённой дозы внешнего облучения почвенных животных определяли по величине удельной активности  $i$ -го радионуклида в корнеобитаемом слое почвы:

$$P_{\text{общ}, i} = \text{КДП}_{\text{внеш}, i}^{\text{почва}} \cdot C_{\text{почв}, i}, \quad (8)$$

где  $\text{КДП}_{\text{внеш}, i}^{\text{почва}}$  – коэффициент дозового преобразования для внешнего облучения почвенных животных от  $i$ -го радионуклида в корнеобитаемом слое почвы, (мкГр/сут)/(Бк/кг) [3, 5, 7];  $C_{\text{почв}, i}$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида в корнеобитаемом слое почвы, Бк/кг.

При этом предполагали, что концентрация радионуклидов в организме почвенных животных одинакова с концентрацией в окружающей их почве [7].

Плотность выпадений за год рассчитывали с помощью Гауссовой модели рассеяния, исходя из величин интегрального годового выброса  $i$ -го радионуклида, скорости его гравитационного осаждения, среднемноголетнего фактора метеоразбавления и интеграла фактора метеоразбавления на удалении  $x$  метров от источника выброса, среднегодовой постоянной вымывания примеси из атмосферы [9, 10]. Расчёты проводили по трём вариантам:

- *по первому варианту* исходными данными для расчёта среднемноголетнего фактора метеоразбавления и его интеграла являются повторяемость категорий устойчивости атмосферы и соответствующие им скорости ветра на высоте флюгера по направлению ветра с наибольшей частотой реализации [11]. Они были определены в соответствии с методиками оценки устойчивости атмосферы по классификации Тернера, модифицированной ИЭМ, за период с 1999 по 2008 гг. для 6 категорий устойчивости атмосферы (от А до F) и 7 категорий по скорости ветра (от 0 до 6 м/с, с шагом 1 м/с и отдельно для категории > 6 м/с);

- *второй вариант расчёта* предполагает наличие данных по повторяемости категорий устойчивости атмосферы с соответствующими им скоростями ветра для румба наиболее вероятного направления [12];

- *третий вариант расчёта* предполагает, что пользователю известна только частота реализации наиболее вероятных для данной местности направлений ветра, его средней скорости и категории устойчивости атмосферы. В данном случае расчёт среднемноголетнего фактора метеоразбавления существенно упрощался.

Для каждого варианта оценки поглощённых доз разработан программный модуль и выполнен проверочный расчёт в среде Microsoft Excel. Величина различий при сопоставлении полученных результатов не превысила 2% на расстояниях до 30 км и 7% на расстоянии до 100 км от источника выброса. Указанные различия можно объяснить ошибкой при расчёте функций осаждения на больших расстояниях от источника выброса.

## Результаты и обсуждение

**Описание программного средства.** Общая блок-схема программных модулей для расчёта мощности поглощённой дозы представлена на рис. 1.

Программное средство для оценки мощности доз облучения биоты референтных организмов написано в среде программирования IDE Lazarus v 1.6, распространяемой на основе свободной лицензии GNU General Public License, и состоит из 13 программных модулей (рис. 2).



Рис. 1. Блок-схема программных модулей расчёта мощности поглощённой дозы референтных организмов при хронических радиоактивных выпадениях.



Рис. 2. Интерфейс программного средства расчёта мощности поглощённой дозы для референтных организмов при хронических радиоактивных выпадениях.

Первые пять программных модулей программного средства предназначены для расчёта мощности поглощённой дозы (рис. 2):

– «Расчёт доз на румбе с максимальным осаджением» служит для расчёта мощности поглощённой дозы референтных организмов на румбе с наиболее вероятным направлением ветра с учётом повторяемости категории устойчивости атмосферы и соответствующих им диапазонов скоростей ветра (первый вариант расчёта);

– «Расчёт доз на румбе с максимальным осаджением на расстоянии, заданном пользователем» может быть применён для расчёта объёмной активности, плотности выпадений за 30 лет штатных выбросов и мощности поглощённой дозы референтных организмов на расстоянии, заданном пользователем (первый вариант расчёта);

– «Расчёт доз при среднемноголетних метеоусловиях» предназначен для расчёта мощности поглощённой дозы референтных организмов на всём следе радиоактивных выпадений на румбе с известной частотой повторяемости данного направления и среднемноголетней категорией устойчивости атмосферы и соответствующей ей скоростью ветра (третий вариант расчёта);

– «Расчёт доз при среднемноголетних метеоусловиях на расстоянии, заданном пользователем» может быть применён для расчёта объёмной активности, плотности выпадений за 30 лет штатных выбросов и мощности поглощённой дозы референтных организмов на расстоянии, заданном пользователем на румбе со среднемноголетней категорией устойчивости атмосферы и соответствующей ей скоростью ветра (третий вариант расчёта);

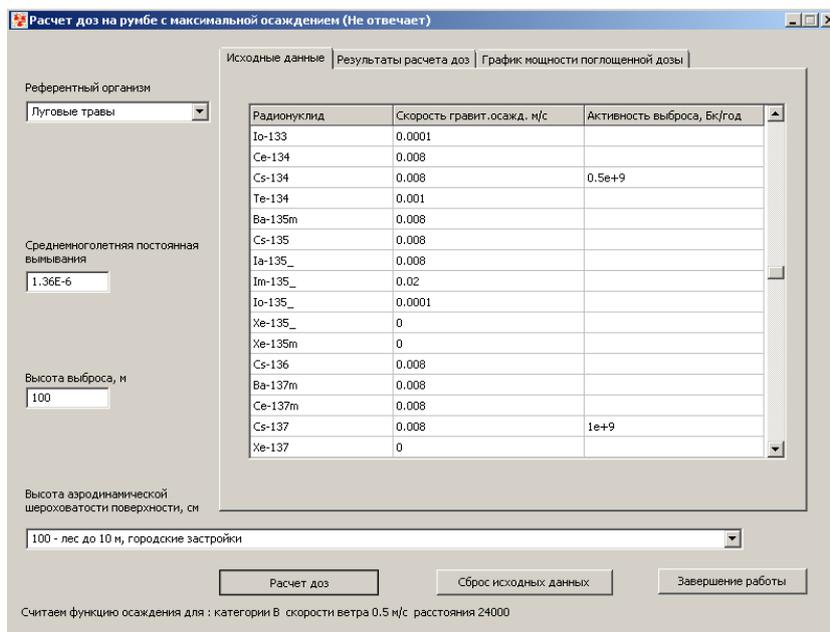
– «Расчёт доз на румбе с максимальным осаджением для осреднённых метеоусловий» служит для оценки мощности поглощённой дозы референтных организмов на румбе, для которого известны значения повторяемостей категории устойчивости атмосферы и соответствующие им средние значения скоростей ветра (второй вариант расчёта).

Остальные программные модули носят вспомогательный характер и служат для подготовки данных для расчёта мощности дозы, постоянной вымывания радионуклидов из атмосферы, позволяют изменять библиотеки, содержащие данные о четырёхстах радионуклидах, и которые включают их периоды полураспада, скорости гравитационного осаджения, коэффициенты накопления и дозового преобразования, плотности загрязнения почвы и удельной активности в ВРС за 50 лет штатных выпадений.

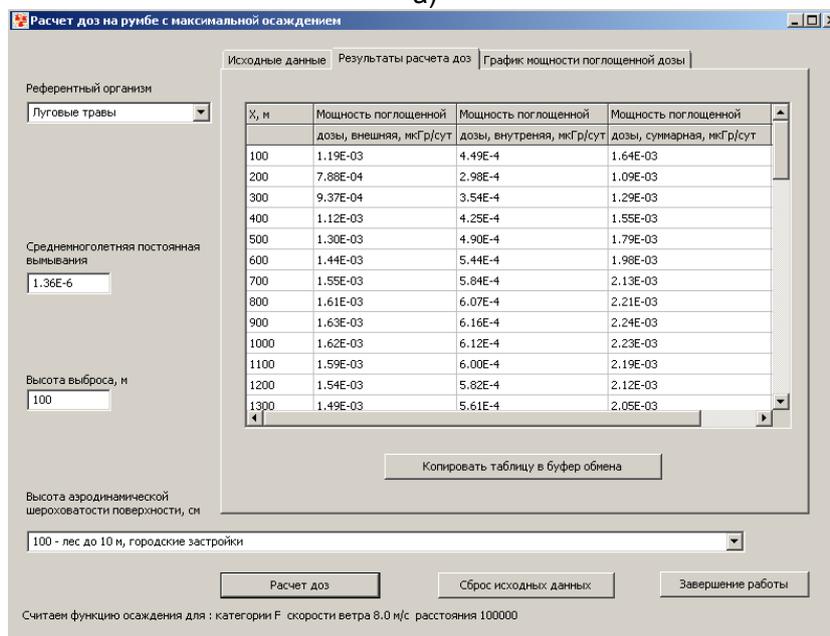
Более подробно остановимся на программных модулях, с помощью которых осуществляется расчёт мощности поглощённой дозы для референтных организмов. Программные модули «Расчёт доз на румбе с максимальным осаджением», «Расчёт доз при среднемноголетних метеоусловиях» и «Расчёт доз на румбе с максимальным осаджением для осреднённых метеоусловий» для различных вариантов расчёта мощности дозы имеют сходный и интуитивно понятный интерфейс (рис. 3а и 3б).

На вкладке «Исходные данные» пользователь осуществляет выбор референтного организма, высоты аэродинамической шероховатости подстилающей поверхности, вводит высоту выброса и среднемноголетнюю постоянную вымывания, рассчитанную с помощью соответствующего программного модуля согласно [10], а также значения активности выброса радионуклидов за год. Отличием модуля «Расчёт доз на румбе с максимальным осаджением для осред-

нённых метеоусловий» является возможность корректировки повторяемости категорий устойчивости атмосферы и скоростей ветра, им соответствующих. В модуле «Расчёт доз при среднелетних метеоусловиях» пользователь имеет возможность выбрать среднелетнюю категорию устойчивости атмосферы и скорость ветра для румба, на котором проводится оценка мощности дозы для определённого румба.



а)



б)

Рис. 3. Интерфейс модуля «Расчёт мощности дозы на румбе с максимальным осадками»: а) – вкладка «Ввод исходных данных», б) – вкладка «Результаты расчёта мощности дозы».

После выполнения расчёта результаты отражаются на вкладках «Результаты расчёта доз» в табличной форме и «График мощности поглощённой дозы» в виде графика. На первой вкладке выводятся данные с расстоянием от источника выброса и соответствующие значения внешней, внутренней и суммарной мощностей поглощённой дозы для выбранного референтного организма (рис. 3б), а на второй вкладке – значения суммарной мощности поглощённой дозы в виде графика. Программные модули «Расчёт доз на румбе с максимальным осадением на расстоянии, заданном пользователем» и «Расчёт доз при среднемноголетних метеоусловиях на расстоянии, заданном пользователем» позволяют рассчитать мощность поглощённой дозы для выбранного референтного организма на расстоянии от источника выброса, которое вводит пользователь в соответствии с первым и третьим вариантами расчёта мощности дозы соответственно (рис. 3а). Оба программных модуля имеют одинаковый интерфейс. Пользователь осуществляет выбор тех же параметров, что и в предыдущих модулях, а также ввод расстояния, на котором рассчитывается мощность поглощённой дозы для выбранного референтного организма и значения активности годового выброса радионуклидов. После окончания расчёта напротив радионуклидов, по которым введена величина активности, отражаются данные по величине объёмной активности в воздухе, плотности загрязнения почвы за 30 лет выпадений и значения мощностей внешней, внутренней и суммарной поглощённых доз (рис. 4а). На вкладке «Вклад радионуклидов в мощность дозы» отражаются все радионуклиды с ненулевой активностью годового выброса, соответствующие им величины мощности внешней, внутренней и суммарной поглощённых доз, а также сумма по каждому из вышеотмеченных дозовых показателей. Кроме того, рассчитывается вклад каждого радионуклида в соответствующий показатель мощности поглощённой дозы, что позволяет определить наиболее значимые радионуклиды для внешнего, внутреннего или суммарного облучения, выбранного пользователем референтного организма (рис. 4б).

Радионуклид	Скорость осад. м/с	Активность выброса, Бк/год	Объёмная акт., Бк/м3	Плотн. загр. 30 лет, Бк/м2	Мощн.поглощенной внешн.дозы, мкГр/сут	Мощн.поглощенной внутр.дозы, мкГр/сут	Мощн.поглощенной сум.дозы, мкГр/сут
Mn-52	0.008	1e+7	6.44E-08	3.87E-04	7.39E-08	4.10E-07	4.84E-07
Mn-53	0.008	2e+7	1.29E-07	1.05E+00	3.42E-08	1.42E-08	4.84E-08
Mn-54	0.008	1e+7	6.46E-08	2.17E-02	1.06E-06	1.86E-07	1.25E-06
Fe-55	0.008	8e+6	5.17E-08	5.56E-02	6.11E-09	1.56E-08	2.17E-08
Co-56	0.008	4e+6	2.59E-08	2.15E-03	3.98E-07	6.47E-07	1.04E-06
Ni-56	0.008						
Mn-56	0.008						
Co-57	0.008	3e+6	1.94E-08	5.66E-03	5.05E-08	1.33E-08	6.38E-08
Ni-57	0.008						
Co-58	0.008						

Выбор референтного организма	Сумма мощностей поглощ. дозы по радионуклидам, мкГр/сут	Внешняя	Внутренняя	Сумма
Луговые травы		1.62E-06	1.29E-06	2.91E-06

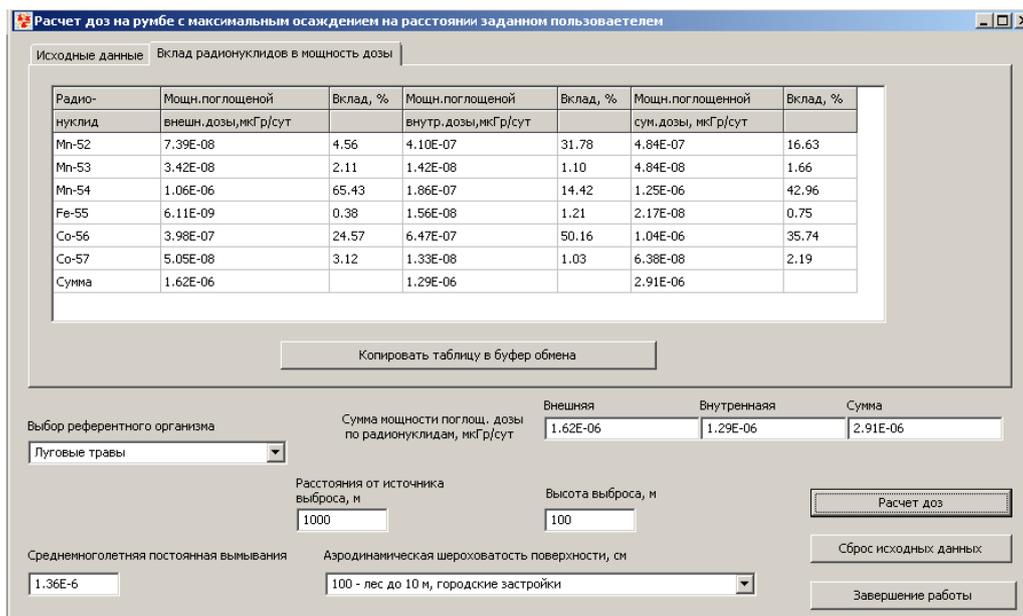
  

Расстояние от источника выброса, м	Высота выброса, м
1000	100

Среднемноголетняя постоянная вымывания	Аэродинамическая шероховатость поверхности, см
1.36E-6	100 - лес до 10 м, городские застройки

а)



б)

Рис. 4. Интерфейс модуля «Расчёт доз на румбе с максимальным осадением на расстоянии, заданном пользователем»: а) – вкладка «Исходные данные», б) – вкладка «Вклад радионуклидов в мощность дозы».

Верификацию результатов расчётов, выполненных с помощью программного модуля, проводили путём сравнения рассчитанных значений среднегодежного фактора метеоразбавления с литературными данными (рис. 5) [13].

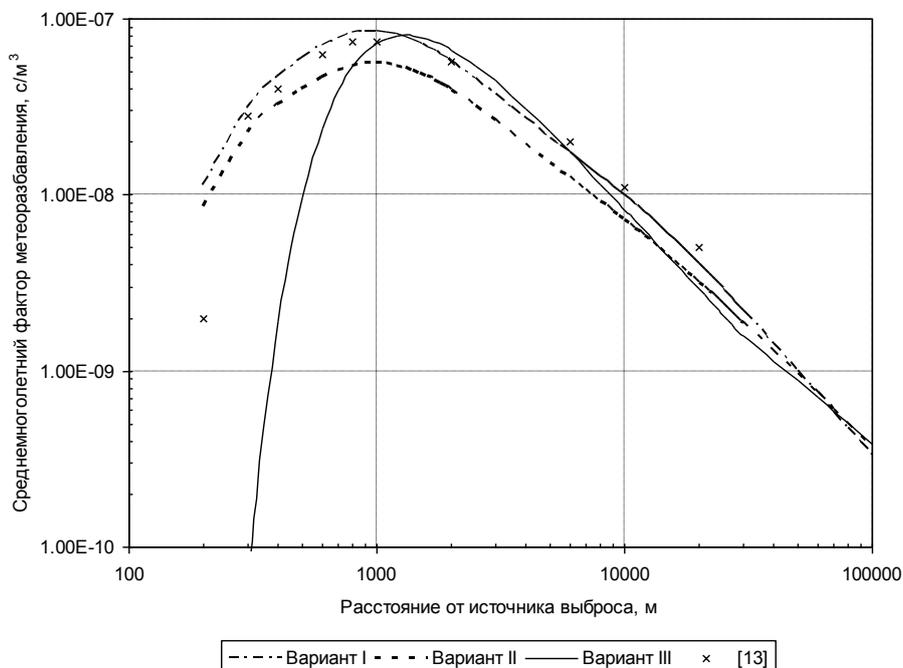
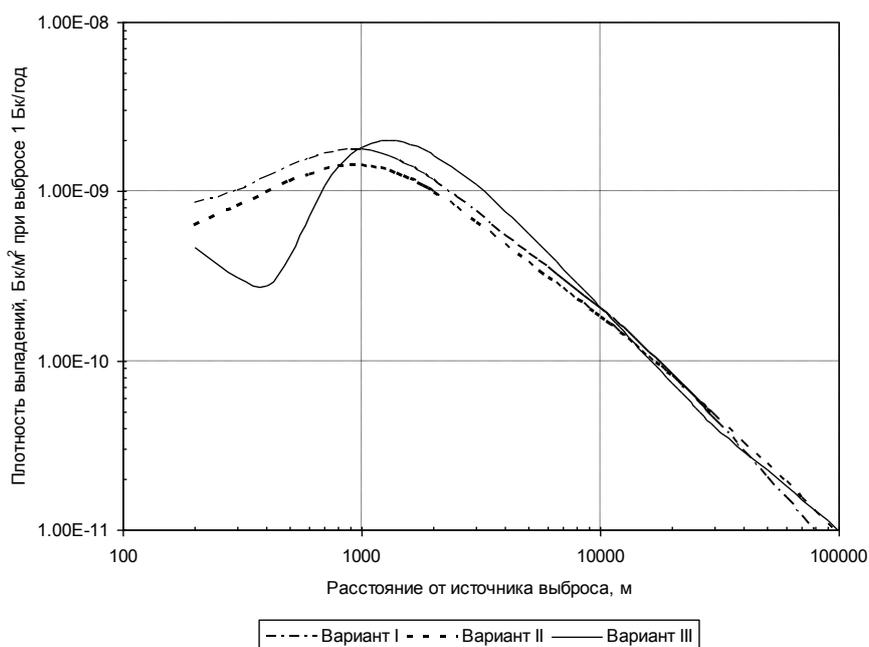


Рис. 5. Результаты верификации модельных расчётов среднегодежного фактора метеоразбавления.

Установлена хорошая сходимость полученных результатов для первого варианта расчётов (при известных повторяемостях категорий устойчивости атмосферы для различных категорий скорости ветра). При втором варианте расчёта (известны повторяемости категорий устойчивости атмосферы и соответствующие им скорости ветра) наблюдается систематическое занижение расчётных значений фактора среднегодовалого метеоразбавления по сравнению с литературными данными. При расчёте фактора метеоразбавления по третьему варианту можно отметить хорошую сходимость результатов расчёта с литературными данными в диапазоне расстояний 1000 – 10000 м до источника выброса.

Сопоставляя полученные результаты, следует отметить отсутствие противоречий между ними, так как последний вариант учитывает только одну категорию устойчивости атмосферы (обычно, D – нейтральные условия), в то время как первый и второй варианты – все остальные, а именно категории устойчивости A и B определяют существенное отложение вблизи источника выброса (рис. 5). Различия между вторым и первым вариантами расчёта среднегодовалого фактора метеоразбавления обусловлены применением средневзвешенной величины скоростей ветра во втором варианте, в то время как в первом варианте учитываются повторяемости категорий устойчивости атмосферы и скоростей ветра в широком диапазоне, при существенном вкладе малых скоростей ветра, способствующем меньшему разбавлению примеси.

На рис. 6 приведены результаты расчётов плотности загрязнения почвы ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ) при выбросе 1  $\text{Бк}/\text{год}$ . Как следует из представленных данных, наибольшие расхождения плотности загрязнения наблюдаются на расстоянии до 1000 м от источника выпадений, однако, если расчёт плотности выпадений по первому и второму вариантам расчёта позволяет получить сопоставимые результаты, то по третьему варианту – исследуемый показатель значительно ниже по сравнению с предыдущими вариантами.



**Рис. 6.** Плотность загрязнения почвы при различных вариантах расчёта для выброса 1  $\text{Бк}/\text{год}$ .

На расстоянии более 6000 м различия по плотности загрязнения почвы, в целом, нивелируются, и расчёт по всем трём вариантам позволяет получить сопоставимые результаты.

Верификацию расчётов мощности поглощённой дозы, выполненных с помощью разработанного программного средства, проводили методом сравнения полученных результатов с программой Erica Assessment Tool (v. 1.0) (табл. 1).

Таблица 1  
Верификация мощности поглощённой дозы для референтных организмов, мкГр/сут

Сравниваемые показатели		Радионуклид			
		<sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>241</sup> Am
Растения (сосна обыкновенная)					
1		6,8E-04	2,8E-04	9,0E-04	5,7E-05
2	5% перцентиль	3,6E-04	3,8E-05	1,8E-04	7,7E-06
	25% перцентиль	9,4E-04	1,0E-04	4,2E-04	2,0E-05
	медиана	1,5E-03	1,5E-04	6,4E-04	3,4E-05
	75% перцентиль	2,1E-03	2,1E-04	9,0E-04	6,0E-05
	95% перцентиль	3,2E-03	3,5E-04	1,6E-03	1,2E-04
Мелкие млекопитающие (мышь)					
1		7,2E-03	4,7E-04	2,9E-03	1,1E-03
2	5% перцентиль	3,6E-04	1,3E-04	7,1E-04	3,6E-04
	25% перцентиль	1,3E-03	3,4E-04	1,8E-03	1,4E-03
	медиана	3,1E-03	5,2E-04	2,8E-03	4,0E-03
	75% перцентиль	7,2E-03	7,6E-04	4,5E-03	1,1E-02
	95% перцентиль	2,0E-02	1,3E-03	1,1E-02	4,3E-02
Крупные млекопитающие (олень)					
1		7,2E-03	9,6E-04	4,7E-03	1,1E-03
2	5% перцентиль	3,8E-04	9,3E-05	4,9E-04	3,3E-04
	25% перцентиль	1,4E-03	2,7E-04	1,4E-03	1,3E-03
	медиана	3,3E-03	5,3E-04	2,7E-03	3,9E-03
	75% перцентиль	7,5E-03	1,1E-03	5,7E-03	1,1E-02
	95% перцентиль	2,1E-02	3,0E-03	1,8E-02	4,3E-02
Почвенная биота (дождевой червь)					
1		9,2E-04	3,1E-04	1,8E-03	6,5E-02
2	5% перцентиль	7,2E-07	8,9E-05	4,3E-04	3,2E-03
	25% перцентиль	5,0E-06	2,7E-04	1,1E-03	8,0E-03
	медиана	1,5E-05	4,0E-04	1,6E-03	1,6E-02
	75% перцентиль	3,5E-05	5,4E-04	2,1E-03	3,2E-02
	95% перцентиль	8,4E-05	7,3E-04	2,9E-03	8,3E-02

Примечание: 1 – точечная оценка мощности поглощённой дозы, рассчитанная посредством разработанного программного средства; 2 – статистические показатели логнормального распределения мощности поглощённой дозы, рассчитанные с помощью пакета Erica Assessment Tool.

Как следует из представленных данных, в большинстве своём рассчитанные нами значения мощности дозы находятся в диапазоне межквартильного размаха аналогичного показателя, рассчитанного в Erica Assessment Tool. При этом наилучшее соответствие установлено по <sup>137</sup>Cs и <sup>134</sup>Cs для мелких млекопитающих и почвенной биоты: полученные нами значения соответствуют медиане мощности дозы, рассчитанной в Erica Assessment Tool. Для млекопитающих по <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y рассчитанными нами значения мощности дозы примерно соответствуют 75% перцентилю, а по <sup>241</sup>Am – 25% перцентилю аналогичного показателя, полученного в Erica, что также можно рассматривать как хорошее соответствие данных. Для почвенных животных мощность поглощённой дозы по <sup>241</sup>Am, рассчитанная с помощью разработанной нами программы, нахо-

дится между 75% и 95% перцентилями, полученными в Erica Assessment Tool, а для сосны по  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  – в пределах между 5-25% перцентилями.

В целом, проведённые верификационные расчёты мощности поглощённой дозы, а также сравнение рассчитанных факторов среднемноголетнего метеоразбавления с литературными данными позволяет сделать вывод об удовлетворительном соответствии полученных нами радиационных показателей с независимыми данными и возможности проведения на их основе корректных оценок радиационного воздействия на биоту.

### Заключение

Разработанное программное средство базируется на Гауссовой модели рассеяния радионуклидов при штатных радиоактивных выбросах, позволяет рассчитать плотность загрязнения почвы и на её основе оценить внешнюю, внутреннюю и суммарную мощность поглощённой дозы для выбранного пользователем референтного организма на различном расстоянии от источника радиоактивных выпадений. Таким образом, пользователь имеет возможность не только определить, на каком расстоянии реализуется та или иная величина мощности дозы в зависимости от набора радионуклидов в составе выброса, но и вклад отдельных радионуклидов в дозовые показатели. Приемлемая точность программного средства для расчёта величин мощности поглощённой дозы подтверждается хорошей сходимостью значений среднемноголетнего фактора метеоразбавления с литературными данными [13], а также мощности поглощённой дозы с величинами дозовых показателей, рассчитанных Erica Assessment Tool.

Таким образом, программное средство является относительно простым и удобным инструментом оценки мощности поглощённых доз для референтных организмов при широком спектре радионуклидов выброса на румбе выпадений.

Вместе с тем, хотелось бы отметить направления дальнейшего совершенствования программного средства. Желательно выполнять расчёты мощности дозы не только в линейном направлении по отдельно взятому румбу от источника выброса, но и по всей розе ветров, т.е. охватывая всё пространство вокруг источника выброса, с оценкой площади, на которой реализуется диапазон мощности доз. При этом следует отметить, что разработанное программное средство не корректно применять для оценки мощности поглощённой дозы для референтных организмов при аварийных радиоактивных выпадениях. Данное обстоятельство связано с тем, что удельная активность радионуклидов в воздушно-растительной среде и организме животных рассчитана из условия установления равновесия между поступлением и выведением радиоактивных веществ. Из условия равновесия рассчитаны и коэффициенты дозового преобразования для животных. При аварийных радиоактивных выпадениях происходит относительно быстрое перераспределение радионуклидов в организме животных и по этой причине необходима оценка доз облучения референтных организмов на основе динамических моделей.

## Литература

1. Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» //Российская газета. 12 января 2002 г. № 6 (2874).
2. **Коренков И.П., Шандала Н.К., Лащенова Т.Н., Соболев А.И.** Защита окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов /под ред. И.П. Коренкова и К.В. Котенко. М.: БИНОМ, 2014. 440 с.
3. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту /под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М., 2015. 265 с.
4. ICRP Publication 91. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection //Ann. ICRP. 2003. V. 33, N 3. P. 1-70.
5. ICRP Publication 108. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 4-6. P. 1-245.
6. ICRP Publication 114. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection //Ann. ICRP. 2009. V. 39, N 6. P. 1-111.
7. Методика разработки нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ДВ-2010) в 2 томах. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2010. Т. 2: Технические приложения, рекомендации для расчётов. 216 с.
8. **Beresford N.A., Brown J., Copplestone D., Garnier-Laplace J., Howard B., Larsson C.M., Oughton D., Prohl G., Zinger I.** (Eds.). An Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. 2007.
9. **Гусев Н.Г., Беляев В.А.** Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
10. ДВ-98: Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу. М.: Госкомэкология РФ, Минатом РФ, 1999. 329 с.
11. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Книга 11. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4. Часть 8. Отчёт об ОВОС. Министерство энергетики Республики Беларусь. (Редакция 06.07.2010 г.). Проектное научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие «БелНИПИЭнергопром», 2010. 532 с.
12. **Козлов В.Ф.** Справочник по радиационной безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1991. 352 с.
13. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы /под ред. Е.Н. Теверовского и И.А. Терновского. М.: Атомиздат, 1980. 242 с.

## Software for estimating radiation dose to reference organisms following long-term exposure to radioactive fallouts

Perevolotskaya T.V., Perevolotsky A.N., Spiridonov S.I.

Russian Institute of Radiology and Agroecology (RIRAE), Obninsk

Method for evaluating absorbed dose rate to reference organisms of terrestrial biogeocenosis following chronic exposure to radioactive fallouts is presented in the article. The software with a set of libraries of dose conversion coefficients for estimating absorbed dose rate to reference organisms being on different distances from a source of radiation was developed using Lazarus programming environment and Object Pascal language. The results of the software testing show that calculated long-term average annual coefficients of atmospheric dilution are comparable with the published data, and dose values are comparable with the values calculated with the Erica Assessment Tool. Calculation of radioactive contamination levels and radiation doses to biota using different methods results in nonsignificant difference if a source of radiation is located 6000 m far from an exposed organism. Main program modules used for calculating absorbed dose rate to reference organisms are described in the article. Authors also consider trends and techniques in development of software tools for evaluation of radiation doses to biota. The presented software can be used for estimating radiation dose to biota of terrestrial biogeocenosis in the vicinity of nuclear fuel cycle plants.

**Keywords:** radiation, radioactive fallouts, nuclear fuel cycle facilities, reference organisms, terrestrial biogeocenoses, absorbed radiation dose rate, dose conversion coefficients, dispersion model, meteorological factor, fallout density, interception coefficient, purification constant.

### References

1. Federal Law of 10 January 2002 N 7-FZ "On the protection of the environment". Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823) (Accessed on 14.06.2017). (In Russian).
2. **Korenkov I.P., Shandala N. K., Lashchenova T.N., Sobolev A.I.** Environmental protection during operation and decommission of radiation hazardous facilities. Eds.: I.P. Korenkov and K.V. Kotenko. Moscow, BINOM, 2014. 440 p. (In Russian).
3. Practical recommendations for assessment of radiation impact on human and biota. Eds.: I.I. Linge and I.I. Kryshev. Moscow, 2015. 265 p. (In Russian).
4. ICRP Publication 91. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP*, 2003, vol. 33, no. 3, pp. 1-70.
5. ICRP Publication 108. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP*, 2008, vol. 38, no. 4-6, pp. 1-245.
6. ICRP Publication 114. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP*, 2009, vol. 39, no. 6, pp. 1-111.
7. Methodology for development of standards of maximum permissible release of radioactive material into the atmosphere (DV-2010) in 2 volumes. Moscow, Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, 2010. V. 2: Technical applications, recommendations for calculations, 216 p. (In Russian).
8. **Beresford N.A., Brown J., Coplestone D., Garnier-Laplace J., Howard B., Larsson C.M., Oughton D., Prohl G., Zinge I.** (Eds.). An Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. 2007.
9. **Gusev N.G., Belyaev V.A.** Radioactive emissions into the biosphere: Handbook. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 256 p. (In Russian).

**Perevolotskaya T.V.\*** – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; **Perevolotsky A.N.** – Lead. Researcher, D.Sc., Biol.; **Spiridonov S.I.** – Head of Lab., D.Sc., Biol., Prof. RIRAE.

\*Contacts: Kievskoe Sh., 109 km, Obninsk, Kaluga region, Russia, 249032. Tel. +7(484) 399-69-59; e-mail: riar@mail.ru.

10. PE-98: The guide for the establishment of permissible emissions of radioactive materials to the atmosphere. Moscow, Goskomekologiya of the Russian Federation, Minatom of the Russian Federation, 1999. 329 p. (In Russian).
11. The justification of investment to the construction of a nuclear power plant in Belarus. Book 11. Assessing the impact on the environment. 1588 PZ-OI4. Part 8. EIA report. Ministry of Energy. (Version 06.07.2010), 532 p. (In Russian).
12. **Kozlov V. F.** Radiation safety guide. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 352 p. (In Russian).
13. Permissible emissions of radioactive and toxic chemical substances into atmospheric boundary layer. Eds.: E.N. Teverovsky and I.A. Ternovsky. Moscow, Atomizdat, 1980. 242 p. (In Russian).