

Модель расчета доз облучения клеток трахеобронхиального отдела при движении точечного источника бета-излучения

В.С. Репин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В статье предложены модель и метод расчета доз бета-облучения секреторных и базальных клеток трахеобронхиального отдела респираторного тракта при движении точечного источника бета-излучения активностью 1 Бк по внутренней поверхности респираторных образований. Количественно результаты расчетов выполнены на примере точечного источника ^{90}Y . В модели расчета доз учтены скорость перемещения источника излучения в каждом респираторном образовании, размеры респираторных образований и глубина залегания секреторных и базальных клеток. Расчеты выполнены для цилиндрической геометрической модели респираторного образования. При оценке доз рассматривались два вида клеток: клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет бронха (клетки типа 1), и клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет бронха (клетки типа 2). Результаты расчетов показали, что с возрастанием номера генерации (порядка ответвления респираторного образования) средние дозы облучения клеток типа 1 более чем в 10 раз больше клеток типа 2. С увеличением номера генерации в трахеобронхиальном дереве дозы на клетки увеличиваются на несколько порядков. Наибольшие дозы формируются в бронхиолах 9–15 генераций, достигая единиц и десятков миллиГрей. Несмотря на то, что с увеличением номера генерации общее число облучаемых клеток уменьшается, коллективные дозы облучения клеток (сумма доз на все клетки респираторного образования) в последних генерациях в 30–50 раз больше доз первых генераций. Таким образом, в случае единичного точечного источника имеет место существенный (на много порядков) разброс доз на отдельные клетки в отдельно взятом респираторном образовании, а также значительные различия в средних дозах трахеи, отдельных бронхов и бронхиол.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, респираторный тракт, секреторные клетки, базальные клетки, горячие частицы, дозы бета-излучения.

Введение

В результате аварии на 4 энергоблоке Чернобыльской АЭС в окружающую среду было выброшено большое количество радионуклидов, приведшее к интенсивному радиоактивному загрязнению территории вокруг атомной станции [1–10]. В соответствии с данными, представленными в книге под редакцией Ю.А. Израэля, можно выделить 3 основных фазы выброса [4]:

- механический (вместе со взрывной волной);
- тепловой, характеризующийся интенсивным выходом летучих изотопов йода и цезия и распространением их на значительные расстояния;
- тепловой, высокотемпературный, происходивший в результате повышения температуры в активной зоне реактора более 1700°C и сопровождавшийся выносом продуктов деления в аэрозольной форме на частицах продуктов горения графита на дальние расстояния в соответствии с метеообстановкой.

Формирование радиационной обстановки в ближней зоне станции, в частности, в г. Припять, происходило посредством выпадения радионуклидов, в основном, в составе топливных частиц, образовавшихся в результате механического разрушения реактора.

Оценка доз внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов оказалась одной из наиболее сложных задач по целому ряду причин.

Во-первых, в респираторный тракт в составе аэрозолей поступало одновременно большое количество радионуклидов.

Во-вторых, в органы дыхания жителей г. Припять поступали крупные аэрозоли.

Оценка доз облучения респираторного тракта стала предметом отдельного обсуждения в связи с так называемыми «горячими частицами» (ГЧ) – наиболее крупными топливными частицами, в составе которых поступали радионуклиды [11–19]. Суть обсуждений сводилась к

Репин Виктор Степанович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

тому, чтобы выяснить радиобиологическое значение ГЧ, то есть дать ответ на вопрос, обладает ли отдельная ГЧ или множество ингалированных ГЧ более выраженным риском облучения по сравнению с риском, рассчитанным по модели, предложенной для расчетов доз облучения клеток респираторного тракта в публикации МКРЗ 66 [20]. Результаты сопоставления и анализа различных данных о последствиях равномерного и неравномерного облучения, полученные в исследованиях на животных при интратрахеальном введении радиоактивных аэрозолей различной дисперсности, в исследованиях с облучением кожи или плоских клеточных культур фибробластов мышей, представленные в обзоре 2003 г. [21] приводят к мысли, что нет оснований «драматизировать» последствия облучения горячими частицами, то есть риск облучения не больше, чем при равномерном облучении. В обзоре приводятся также экспериментальные данные, показывающие, что риск последствий облучения легких у мышей мелкодисперсными аэрозолями окиси ^{239}Pu при одинаковых дозах возрастает, при уменьшении размера аэрозолей. В работе 2007 г. [22] отмечено, что для окончательного вывода об опасности горячих частиц для людей пока мало эпидемиологических данных, поскольку мала вероятность поступления крупных частиц в глубокие отделы респираторного тракта, хотя и оснований для повышенного беспокойства также нет.

При ингаляционном поступлении радионуклидов для оценки дозы используется модель, опубликованная в 66 публикации МКРЗ [20], вышедшая в 1994 г. Разъяснения по ее практическому применению даны в руководстве МКРЗ, вышедшем в 2002 г. [23]. Последняя модификация данной модели представлена в публикации МКРЗ 130 (часть 1) в 2015 г. [24]. Важной особенностью применения модели МКРЗ является усреднение доз, полученных базальными и секреторными клетками за период пребывания отложившихся аэрозолей в отделах респираторного тракта. Для оценки доз используется понятие поглощенной фракции энергии $AF(T \leftarrow S)$, то есть части энергии, испущенной источником, находящемся в органе, – источнике S и поглощенной в органе-мишени T (чувствительные к излучению клетки). Расчет $AF(T \leftarrow S)$ выполнен для цилиндрической геометрии, описывающей форму респираторных образований. Для сценария равномерного распределения активности по внутренней поверхности респираторного образования мощность поглощенной дозы на клетки бронхов и бронхиол рассчитывается, согласно [24] по формуле (1):

$$\dot{H}_T(t) = q(t) \cdot SEE(T \leftarrow S), \quad (1)$$

где $SEE(T \leftarrow S)$ – удельная эквивалентная доза в ткани-мишени на одно радиоактивное превращение источника S с активностью $q(t)$;

$$SEE(T \leftarrow S) = \frac{Q_i \cdot Y_i \cdot E_i \cdot AF(T \leftarrow S)}{M_T}, \quad (2)$$

где Q_i – коэффициент качества i -го излучения;

Y_i – выход i -го излучения на одно радиоактивное превращение;

E_i – средняя энергия i -го излучения;

$AF(T \leftarrow S)$ – фракция поглощенной энергии.

Ожидаемая эквивалентная доза на бронхи или бронхиолы за период с момента поступления радиоактивных

аэрозолей – t_0 до возраста 70 лет рассчитывается по формуле 3:

$$H_T = \int_{t_0}^{70} \dot{H}_T(t) dt \quad (3)$$

Рассчитываемые по формулам 1–3 эквивалентные дозы облучения отделов респираторного тракта, к сожалению, не дают полного представления о дозах облучения отдельных чувствительных к излучению клеток, выстилающих поверхность респираторного тракта, и количестве клеток, попадающих в тот или иной дозовый диапазон. Используемая в публикации 66 МКРЗ модель расчета дозы, основанная на сценарии равномерного распределения активности на внутренней поверхности респираторного образования, заведомо не дает представления о дозах от отдельной аэрозольной частицы (точечного источника) или от множества одновременно перемещаемых по трахеобронхиальному дереву частицам.

Цель исследования – расчет доз облучения секреторных и базальных клеток трахеобронхиального отдела респираторного тракта при движении отдельного точечного бета-источника.

Материалы и методы

Схема расчета доз при движении точечного источника по внутренней поверхности респираторного образования (трахея, бронх, бронхиола) включала разработку методического подхода и алгоритма, непосредственное проведение расчетов и анализ полученных результатов.

В основу настоящих расчетов, так же, как и в публикации МКРЗ-66 [20], положена цилиндрическая конфигурация отдельных образований трахеобронхиального отдела (ТБО). Размеры отдельных респираторных образований (РО) от трахеи до 15 генерации (порядок ответвления очередного РО) и их количественная характеристика, приведенные в таблице 1, аналогичны данным, представленным в публикации МКРЗ-66.

В отличие от модели МКРЗ-66, в которой скорость очистки отделов респираторного тракта дана в единицах периода получищения, в данной работе использовалась скорость мукоцилиарной очистки, рассчитываемая для каждой генерации по формуле, заимствованной из работы [29]:

$$V_{cl} = 0.0105 \cdot 2^{\left(-2 \cdot \frac{N_{gen}}{3}\right)}, \quad (4)$$

где V_{cl} – скорость мукоцилиарной очистки, см/с;

N_{gen} – номер генерации.

Такой подход позволяет точнее оценить время нахождения точечного источника в пределах отдельного респираторного образования.

Время перемещения точечного источника t_{cl} (в секундах) от начала до конца каждого РО, представленное в таблице 1, рассчитывалось посредством деления его длины $L(N_{gen})$ на соответствующую скорость $V_{cl}(N_{gen})$.

В соответствии с моделью МКРЗ-66 [20] между источником и мишенью облучения располагается слой слизи, реснитчатый слой и слой эпителия. В зависимости от номера генерации суммарная толщина этих слоев, а значит, и глубина залегания секреторных и базальных клеток, различаются. В таблице 1 приведены средние значения толщины слоя, поглощающего бета-излучение, под которым расположены клетки-мишени.

Характеристика респираторных образований трахеобронхиального отдела респираторного тракта взрослого человека

Таблица 1

[Table 1]

Characteristics of respiratory masses of the adult tracheobronchial respiratory tract]

Номер генерации [Generation number]	Диаметр РО, см [Diameter, cm]	Длина РО, см [Length, cm]	Глубина залегания секреторных клеток, см [Depth of secretory cells, cm]	Глубина залегания базальных клеток, см [Depth of basal cells, cm]	Число образо- ваний в генерации [The number of formations in the generation]	Время прохож- дения образова- ния, с [Time of passage of formation, sec]	Число клеток [Number of cells]	В том числе [Including]	
								Секреторных [Secretory]	Базальных [Basal]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,65	9,1	2,50E-03	4,00E-03	1	1375,7	47171000	31447333	15723667
1	1,2	3,8	2,50E-03	4,00E-03	2	911,94	14326000	9550667	4775333
2	0,85	1,5	2,50E-03	4,00E-03	4	571,43	4005500	2670333	1335167
3	0,61	0,83	2,50E-03	4,00E-03	8	501,92	1590600	1060400	530200
4	0,44	0,9	2,50E-03	4,00E-03	16	863,95	1244100	829400	414700
5	0,36	0,81	2,50E-03	4,00E-03	32	1234,3	916090	610727	305363
6	0,29	0,66	2,50E-03	4,00E-03	64	1596,5	601300	400867	200433
7	0,24	0,6	2,50E-03	4,00E-03	128	2303,9	452390	301593	150797
8	0,2	0,53	2,50E-03	4,00E-03	256	3230,5	333010	222007	111003
9	0,1651	0,4367	8,00E-04	0	512	4225,3	226510		
10	0,1348	0,362	8,00E-04	0	1024	5560	153300		
11	0,1092	0,3009	8,00E-04	0	2048	7336,2	103230		
12	0,0882	0,25	8,00E-04	0	4096	9675,6	69272		
13	0,072	0,2069	8,00E-04	0	8092	12711	46800		
14	0,0603	0,17	8,00E-04	0	16184	16579	32204		
15	0,0533	0,138	8,00E-04	0	32000	21364	23108		

Количество облучаемых клеток-мишеней, выстилающих внутреннюю поверхность, также зависит от размеров РО. Расчет их количества N_{cell} производился по формуле:

$$N_{cell} = \pi \cdot (D(N_{gen}) + 2 \cdot \Delta d(N_{gen}))/s_{cell} \quad (5)$$

где $D(N_{gen})$ – диаметр соответствующего номеру генерации образования, см;

$\Delta d(N_{gen})$ – толщина поглощающего слоя, см

s_{cell} – средняя площадь клеток-мишеней, принятая равной 0,000001 см².

Результаты расчета числа клеток для образования соответствующей генерации даны в таблице 1.

Расчет числа базальных и секреторных клеток (см. табл. 1) выполнен по соотношению их масс в трахеобронхиальном отделе, приведенных в публикации МКРЗ-66.

Упрощенная двумерная методическая схема (проекция трехмерного изображения), поясняющая подход к расчету поглощенной дозы на отдельные клетки-мишени, показана на рисунке 1. В соответствии с данной схемой бета-частицы точечного источника вылетают из точки (1) под разными углами. Часть бета-частиц не выходит в просвет РО (углы вылета ниже линии б), а часть выходит в просвет. В последнем случае часть пробега бета-части-

цы происходит в воздухе (2), а часть – в слое поглощения (4). Точка входа в слой поглощения (3) разделяет среды поглощения и позволяет рассчитать отдельно длины пробега в воздухе и в ткани.

Схема трехмерной геометрии облучения клеток ТБО показана на рисунке 2. Из рисунка 2 видно, что пробеги бета-частиц в трехмерном представлении модели облучения могут быть больше пробегов, показанных на рисунке 2. Для расчета полного пробега (r) бета-частицы от точечного источника с координатами на внутренней поверхности цилиндра X_0 , Y_0 и Z_0 до клетки мишени на поверхности внешнего цилиндра с координатами x , y , z используется следующая формула:

$$r = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2 + (z - Z_0)^2} \quad (6)$$

Для определения координат точек входа в слой поглощения при движении бета-частицы к конкретным координатам клетки-мишени и для расчета длин пробега в воздухе и в поглотителе производятся следующие расчеты (см. рис. 2):

$$\tan \alpha = \frac{y - Y_0}{x} \quad (7)$$

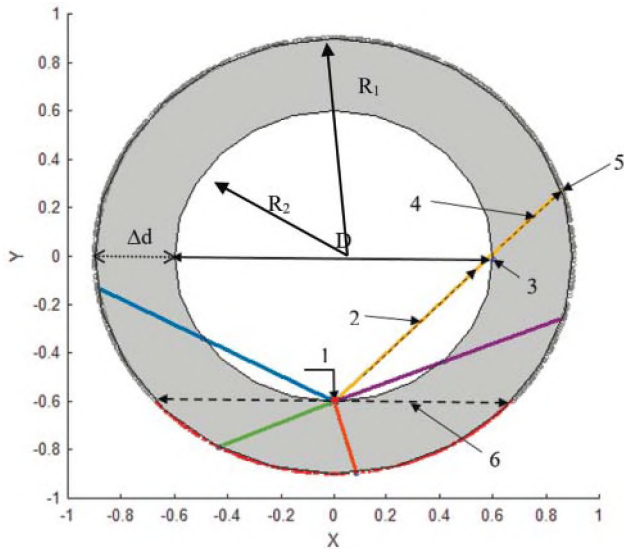


Рис. 1. Двумерная схема, поясняющая подход к расчету поглощенной дозы на отдельные клетки-мишени: 1 – точечный источник; 2 – часть пробега бета частицы в просвете бронха; 3 – точка входа бета-частицы в стенку бронха; 4 – часть пробега бета-частицы в стенке бронха; 5 – облучаемая клетка; 6 – линия, ниже которой бета-частицы не выходят в просвет бронха; D и R2 – диаметр и радиус бронха; R1 – средний радиус залегающих секреторных или базальных клеток; Δd – толщина слоя поглощения

[Fig. 1. Two-dimensional diagram explaining the approach to calculating the absorbed dose for individual target cells: 1 – point source; 2 – part of the path of beta particles in the lumen of the bronchus; 3 – the entry point of beta particles into the bronchial wall; 4 – part of the path of beta particles in the bronchial wall; 5 – exposing cells; 6 – the line below which beta particles do not enter the bronchial lumen; D and R2 – diameter and radius of the bronchus; R1 – average radius of secretory or basal cells; Δd – the thickness of the absorption layer]

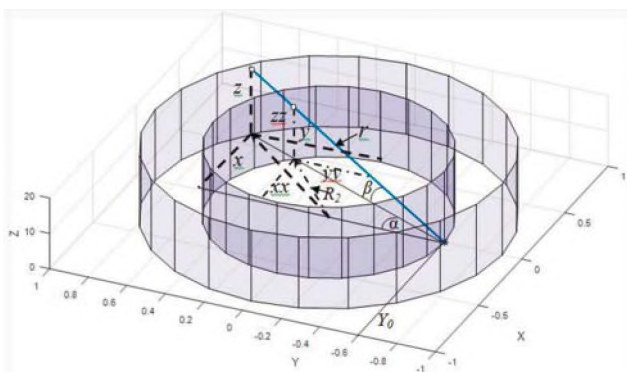


Рис. 2. Схема расчета длин пробегов бета частицы до клетки-мишени в воздухе и поглотителе (все обозначения на рисунке соответствуют формулам 7–12)

[Fig. 2. Scheme for calculating of the beta particle length path in air and absorber (all symbols in the figure correspond to formulas 7–12)]

Координата xx точки входа в слой поглощения находится по формуле 8:

$$xx = \frac{-2 \cdot Y_0 \cdot \tan \alpha}{(1 + \tan^2 \alpha)} \quad (8)$$

Координату yy точки входа вычисляем по формуле 9:

$$yy = \sqrt{R_2^2 - xx^2} \quad (9)$$

Координату zz точки входа вычисляем по формуле 10:

$$zz = \sqrt{xx^2 - (yy - Y_0)^2} \cdot \tan \beta + Z_0 \quad (10)$$

Проведенные вычисления позволяют рассчитать длину пробега бета-частицы в воздухе от точечного источника с координатами X_0 , Y_0 и Z_0 до точки входа в слой поглощения с координатами xx , yy , zz :

$$r_{air} = \sqrt{(xx - X_0)^2 + (yy - Y_0)^2 + (zz - Z_0)^2} \quad (11)$$

Вычитая из суммарной длины пробега бета-частицы пробег в воздухе r_{air} , получим длину пробега в ткани респираторного образования r_{tis} от точки входа до клетки-мишени:

$$r_{tis} = r - r_{air} \quad (12)$$

Расчет доз облучения клеток мишеней выполнен с использованием дозовой функции ослабления мощности дозы $Jr(Rm)$ в воде, табулированные значения которой заимствованы из публикации W.G. Cross et al [26]. Данный метод расчета, описанный в работах [27, 28], использовался при разработке дозиметрической модели публикации 66 МКРЗ. Вид этой функции на примере ^{90}Y приведен на рисунке 3. Особенность данной функции заключается в том, что значения мощности дозы на каждом расстоянии умножены на квадрат этого расстояния, что позволяет избежать резких ее изменений на малых расстояниях.

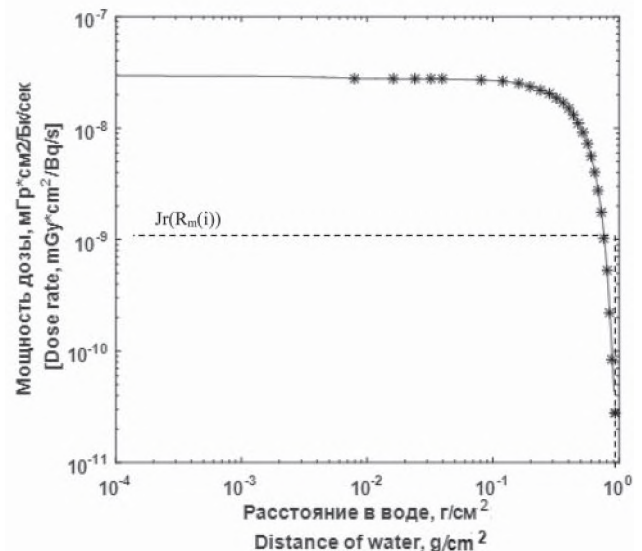


Рис. 3. Функция (Jr) ослабления мощности дозы ^{90}Y в воде (по данным [26])

[Fig. 3. Dose rate attenuation function of ^{90}Y in water (according to [26])]

Расчет суммарного поглощения бета-излучения в воздухе и в ткани в массовых единицах выполнен с учетом их плотности в г/см^3 :

$$R_m = \rho_{air} \cdot r_{air} + \rho_{tis} \cdot r_{tis}, \quad (13)$$

где ρ_{air} – плотность воздуха, принятая равной $0,0012 \text{ г/см}^3$;

r_{air} – длина пробега бета-частицы в воздухе, см;
 ρ_{tis} – плотность ткани стенок респираторного образования, принятая равной плотности воды 1 г/см³;
 r_{tis} – длина пробега бета-частицы в стенке респираторного образования, см.

Допускается, что добавка поглощения в воздухе к поглощению в воде не внесет существенной погрешности при использовании дозовой функции для воды для суммарного поглощения в двух средах.

Полный расчет мощностей доз облучения всех клеток РО включает оценку длин пробегов от текущего положения точечного источника до каждой облучаемой клетки, рассчитанных в единицах массовой плотности (рис. 4).

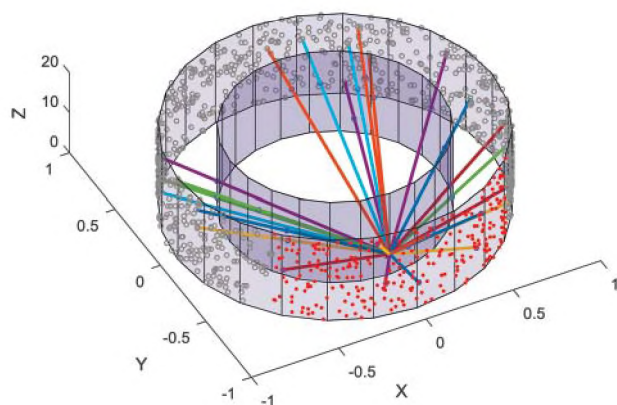


Рис. 4. Иллюстрация схемы расчета доз на клетки респираторного образования
[Fig. 4. Illustration of the scheme for calculating doses to cells of a respiratory unit]

Оценка текущего значения дозовой функции $Jr(R_m)$, представленной на рисунке 3, производилась методом линейной интерполяции.

Мощность дозы для i -й клетки рассчитывалась путем деления $Jr(R_m(i))$ на квадрат расстояния от текущего положения точечного источника до i -й клетки:

$$DR(i) = \frac{Jr(R_m(i))}{r(i)^2} \quad (14)$$

где $DR(i)$ – мощность дозы облучения i -й клетки, МГр·с⁻¹;

Jr – функция ослабления мощности дозы ^{90}Y в воде, МГр·см²·Бк⁻¹·с⁻¹;

$R_m(i)$ – текущее значение пробега в единицах массовой плотности, г·см⁻²;

$r(i)$ – текущее значение длины пробега бета-частицы от точечного источника до i -й клетки-мишени, рассчитываемое по формуле (3).

Учитывая, что точечный источник движется со скоростью V_{cp} , его новое положение приводит к необходимости производить новый расчет мощностей доз на те же клетки.

Алгоритм расчета движущейся частицы включал деление пути движения точечного источника на 200 одинаковых отрезков. Время прохождения каждого отрезка пути Δt_i рассчитывалось путем деления полного времени прохождения респираторного образования (см. табл. 1) на 200. Суммарная доза на отдельную клетку рассчитывалась при этом по формуле:

$$D_i = \sum_{i=1}^{200} DR_i \cdot \Delta t_i \quad (15)$$

Расчет суммарной дозы SD на все клетки респираторного образования после прохождения точечного источника производился по формуле:

$$SD = \sum_i D_i \quad (16)$$

Средняя доза на клетки респираторного образования после прохождения точечного источника рассчитывалась по формуле:

$$\bar{D} = \frac{SD}{N_{cell}}, \quad (17)$$

где SD – суммарная доза облучения всех клеток РО за время прохождения точечного источника, МГр;

N_{cell} – количество базальных или секреторных клеток в соответствующем респираторном образовании.

Алгоритм расчета доз был реализован средствами Matlab R2020b. Компьютерный код включал генерацию 400 000 случаев распределения случайным образом координат расположения секреторных или базальных клеток на соответствующей глубине от внутренней поверхности РО, разделение длины пробега на 200 отрезков, расчет для каждого из 200 положений точечного источника активностью 1 Бк доз на все клетки, которых бета-частицы достигают в процессе поглощения на пути пробега.

Результаты и обсуждение

На рисунке 5 показаны 3 случая конфигурации облучаемых клеток трахеи в процессе перемещения точечного источника ^{90}Y .

Как видно из рисунка 5, для крупного респираторного образования, каким является трахея, бета-частицы ^{90}Y не достигают ряда клеток. При облучении мелкого респираторного образования при любом положении точечного источника все клетки попадают в поле облучения (рис. 6)

На каждом шаге перемещения точечного источника происходит суммирование доз на клетки, попадающие под разными углами в поле облучения. Таким образом, к концу перемещения точечного источника представляется возможным построить гистограмму распределения числа клеток по дозовым интервалам, рассчитать число облучаемых клеток, максимальную и среднюю дозу, а также суммарную дозу облучения всех клеток (коллективная клеточная доза).

На рисунке 7 показаны частотные распределения числа клеток по дозовым интервалам для трахеи, бронха 8 генерации и бронхиолы 15 генерации.

Из рисунка 7 видно, что с уменьшением размеров респираторного образования дозы облучения возрастают, но при этом уменьшается число облучаемых клеток. Количественная характеристика облучения секреторных и базальных клеток трахеобронхиального отдела дана в таблицах 2 и 3. Из всего перечня облучаемых клеток выделены клетки, облучаемые без выхода бета-излучения в просвет РО, то есть ближе всего расположенные к точечному источнику (названные для упрощения клетками типа 1), и клетки, облучаемые при выходе бета-частиц в просвет бронха (клетки типа 2). Уровни облучения клеток ТБО выражены средними и максимальными значениями каждого типа клеток и коллективными клеточными дозами, рассчитанными как сумма доз на все клетки.

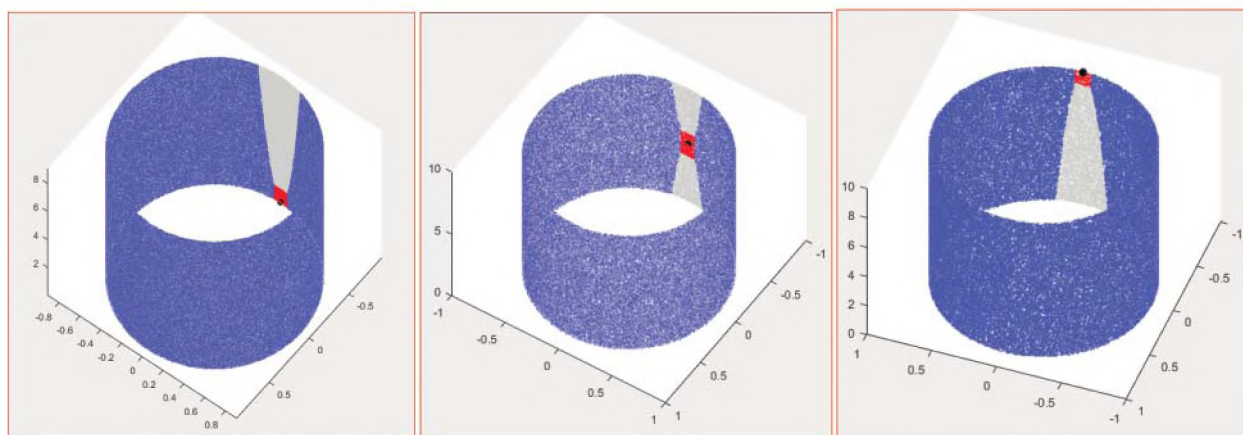


Рис. 5. Распределение облучаемых клеток трахеи под слоем поглощения при положении точечного источника ^{90}Y в начале (слева), в середине и в конце (справа). Красным цветом на рисунке показана конфигурация клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет трахеи

[Fig. 5. Distribution of irradiated tracheal cells under the absorption layer at the point source position at the beginning (left), in the middle and at the end (right). The configuration of cells irradiated without beta particle escape into the tracheal lumen is shown in red]

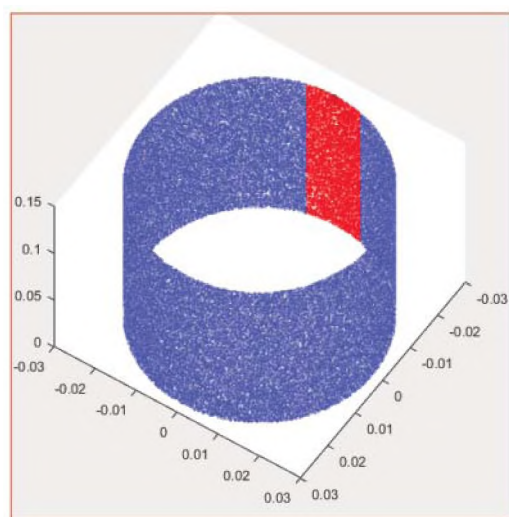


Рис. 6. Распределение облучаемых клеток бронхиолы 15-й генерации при положении точечного источника ^{90}Y в конце. Красным цветом на рисунке показана конфигурация клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет бронхиолы

[Fig. 6. Distribution of irradiated cells of the 15th generation bronchiole at the point source position at the beginning. The configuration of cells irradiated without beta particle escape into the bronchiole lumen is shown in red]

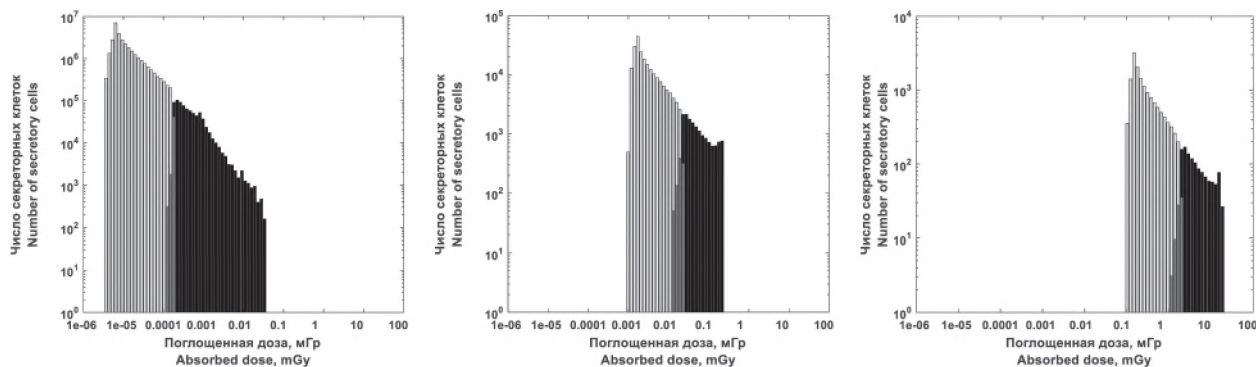


Рис. 7. Частотные распределения доз облучения секреторных клеток за время перемещения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк: трахея (слева); бронх 8-й генерации (посередине); бронхиола 15-й генерации (справа)

[Fig. 7. Frequency distributions of radiation doses to secretory cells during movement of a ^{90}Y point source with the activity 1 Bq: trachea (left); the 8th generation bronchus (middle); the 15th generation bronchiole (right)]

Число облучаемых секреторных клеток и дозы облучения после прохождения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк по респираторным образованиям трахеобронхиального отдела

Таблица 2

[Table 2]

Number of exposed secretory cells and absorbed doses after a ^{90}Y point source with activity of 1 Bq has passed through the respiratory formations of the tracheobronchial region]

№ генерации [Generation number]	Время прохождения, с [Moving time, s]	Число клеток (тип 1) ¹ [Number of cells (type 1)] ¹	Суммарная доза клеток типа 1, мГр [Total dose of type 1 cells, mGy]	Число клеток (тип 2) ² [Number of cells (type 2)] ²	Суммарная доза клеток типа 2, мГр [Total dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 1, мГр [Average dose of type 1 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 2, мГр [Average dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза на все клетки, мГр [Average dose per all cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 1, мГр [Maximum dose of type 1 cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 2, мГр [Maximum dose of type 2 cells, mGy]
0	1375,7	8,1E+04	1,5E+00	3,0E+07	5,0E+02	7,6E-04	1,7E-05	3,6E-05	2,8E-02	1,8E-04
1	911,94	6,6E+04	2,7E+00	9,2E+06	3,0E+02	1,4E-03	3,3E-05	7,4E-05	2,2E-02	3,3E-04
2	571,43	5,7E+04	4,9E+00	2,6E+06	1,5E+02	2,5E-03	6,2E-05	1,5E-04	1,7E-02	6,4E-04
3	501,92	4,4E+04	8,2E+00	1,0E+06	1,2E+02	4,5E-03	1,2E-04	3,0E-04	2,3E-02	1,2E-03
4	863,95	4,0E+04	1,5E+01	8,0E+05	2,1E+02	8,0E-03	2,8E-04	6,5E-04	3,6E-02	2,3E-03
5	1234,3	3,2E+04	2,3E+01	5,9E+05	3,0E+02	1,3E-02	5,4E-04	1,2E-03	5,7E-02	4,1E-03
6	1596,5	2,4E+04	3,2E+01	3,8E+05	3,7E+02	2,3E-02	1,0E-03	2,3E-03	8,8E-02	7,2E-03
7	2303,9	2,0E+04	5,0E+01	2,9E+05	5,3E+02	3,9E-02	2,0E-03	4,3E-03	1,4E-01	1,3E-02
8	3230,5	1,7E+04	1,1E+02	2,0E+05	1,1E+03	6,5E-02	3,6E-03	8,0E-03	2,2E-01	2,2E-02
9	4225,3	1,0E+04	1,1E+02	2,2E+05	1,8E+03	2,5E-01	8,5E-03	1,9E-02	1,3E+00	7,0E-02
10	5560	7,5E+03	1,5E+02	1,5E+05	2,2E+03	4,2E-01	1,6E-02	3,6E-02	2,0E+00	1,2E-01
11	7336,2	5,6E+03	2,1E+02	9,9E+04	2,9E+03	7,2E-01	3,0E-02	6,8E-02	3,0E+00	2,2E-01
12	9675,6	4,3E+03	3,1E+02	6,6E+04	3,6E+03	1,2E+00	5,8E-02	1,3E-01	4,5E+00	3,8E-01
13	12711	3,2E+03	4,4E+02	4,5E+04	4,5E+03	2,0E+00	1,1E-01	2,4E-01	7,1E+00	6,7E-01
14	16579	2,4E+03	6,0E+02	3,1E+04	5,7E+03	3,4E+00	2,0E-01	4,3E-01	1,1E+01	1,2E+00
15	21364	1,8E+03	8,0E+02	2,2E+04	6,9E+03	5,6E+00	3,4E-01	7,5E-01	1,8E+01	1,9E+00

¹) клетки типа 1 – клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [¹] type 1 cells – cells exposed without beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation;]

²) клетки типа 2 – клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [²] type 2 cells – cells irradiated as a result of beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation.]

Таблица 3

Число облучаемых базальных клеток и дозы облучения после прохождения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк
по респираторным образованиям трахеобронхиального отдела

[Table 3]

Number of exposed basal cells and expose doses after a ^{90}Y point source with activity of 1 Bq has passed through the respiratory formations of the tracheobronchial region]

№ генерации [Gene-ration number]	Время прохождения, с [Moving time, s]	Число клеток (тип 1) ¹ [Number of cells (type 1)] ¹	Суммарная доза клеток типа 1, мГр [Total dose of type 1 cells, mGy]	Число клеток (тип 2) ² [Number of cells (type 2)] ²	Суммарная доза клеток типа 2, мГр [Total dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 1, мГр [Average dose of type 1 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 2, мГр [Average dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза на все клетки, мГр [Average dose per all cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 1, мГр [Maximum dose of type 1 cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 2, мГр [Maximum dose of type 2 cells, mGy]
0	1375,7	47984	8,6E-01	1,5E+07	2,2E+02	5,7E-04	1,6E-05	3,3E-05	1,2E-02	1,3E-04
1	911,94	41801	1,5E+00	4,5E+06	1,3E+02	1,0E-03	3,1E-05	6,6E-05	9,2E-03	2,5E-04
2	571,43	35127	2,8E+00	1,3E+06	6,9E+01	1,8E-03	5,6E-05	1,3E-04	9,0E-03	4,9E-04
3	501,92	27652	4,6E+00	5,1E+05	5,2E+01	3,2E-03	1,1E-04	2,7E-04	1,3E-02	9,3E-04
4	863,95	25349	8,7E+00	3,9E+05	9,5E+01	5,7E-03	2,6E-04	5,9E-04	2,1E-02	1,8E-03
5	1234,3	20581	1,3E+01	2,9E+05	1,3E+02	9,7E-03	4,9E-04	1,1E-03	3,4E-02	3,1E-03
6	1596,5	15119	1,8E+01	1,9E+05	1,6E+02	1,6E-02	9,3E-04	2,1E-03	5,3E-02	5,6E-03
7	2303,9	12463	2,8E+01	1,4E+05	2,3E+02	2,8E-02	1,8E-03	3,9E-03	8,4E-02	9,7E-03
8	3230,5	10010	4,1E+01	1,0E+05	3,1E+02	4,7E-02	3,3E-03	7,1E-03	1,3E-01	1,7E-02

¹) клетки типа 1 – клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [¹] type 1 cells – cells exposed without beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation;]

²) клетки типа 2 – клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [²] type 2 cells – cells irradiated as a result of beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation.]

Закключение

Результаты, приведенные в таблицах 2 и 3 и на рисунках 8 и 9, позволяют сделать несколько выводов:

1. С возрастанием номера генерации средние дозы облучения секреторных и базальных клеток за время полного перемещения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк по респираторному образованию увеличиваются на несколько порядков. Наибольшие дозы формируются в бронхиолах 9–15 генераций, достигая единиц и десятков мГр (см. табл. 2 и 3, колонки 7–11, рис. 8).

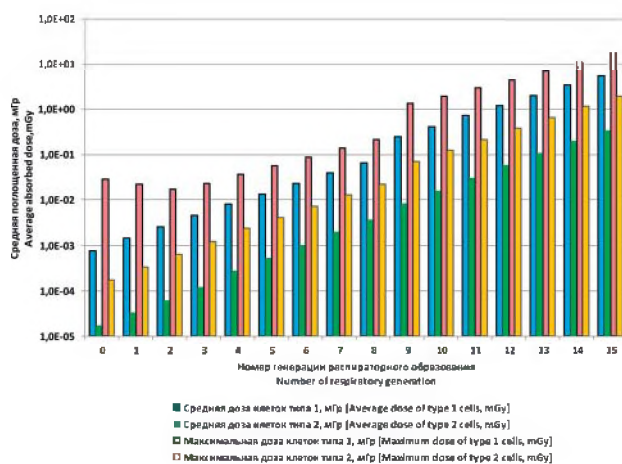


Рис. 8. Диаграмма доз облучения секреторных клеток
[Fig. 8. Diagram of dose exposure of respiratory cells]

2. Средние дозы облучения секреторных клеток в трахее и бронхах больше средних доз облучения базальных клеток примерно на 40% для клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования, и на 10% – для клеток, облучаемых в результате выхода бета-частиц в просвет РО (см. табл. 2 и 3, колонки 7–8).

3. С увеличением номера генерации соотношение максимальных и средних доз уменьшается в 1,5–10 раз (см. табл. 2 и 3, колонки 7–8 и 10–11).

4. С увеличением номера генерации общее число облучаемых клеток уменьшается (см. табл. 2 и 3, колонки 3 и 5), а суммарные дозы клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования и клеток, облучаемых в результате выхода бета-частиц в просвет, возрастают, при этом дозы в последних генерациях в 30–50 раз больше доз первых генераций (см. табл. 2 и 3, колонки 4 и 6, рис. 9).

5. Представленные выводы относятся только к дозам от отдельного точечного источника и не распространяются на случай поступления в респираторный тракт большого числа частиц.

Представленный выше подход к оценке доз облучения клеток респираторного тракта показал, что имеет место существенный (на много порядков) разброс доз на отдельные клетки в отдельном респираторном образовании, а также значительные различия в средних дозах трахеи, отдельных бронхов и бронхиол. Дальнейшее развитие предложенной модели и метода планируется применить для случая поступления в легкие большого числа частиц, распределенных по отделам респираторного тракта, для ретроспективной оценки доз от «черно-

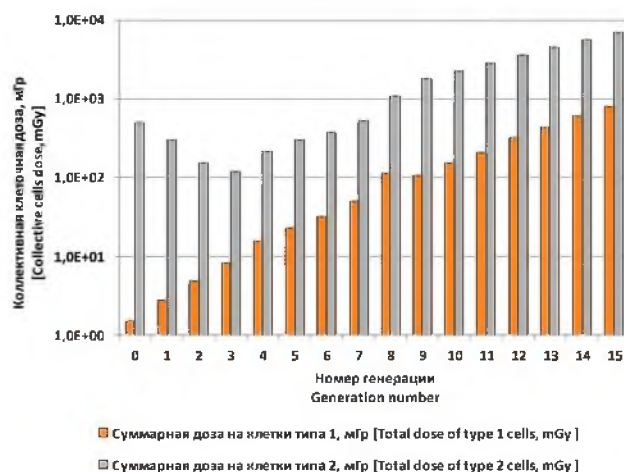


Рис. 9. Коллективные клеточные дозы в различных генерациях респираторного тракта: клетки типа 1 – клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; клетки типа 2 – клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет респираторного образования

[Fig. 9. Collective cellular doses in different generations of the respiratory tract: type 1 cells – cells exposed without beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation; type 2 cells – cells irradiated as a result of beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation]

больших» частиц, а также для сравнения полученных доз с дозами, рассчитанными по стандартной модели МКРЗ.

Литература

1. Авария на ЧАЭС и ее последствия: Информация // Совещание экспертов МАГАТЭ, Вена, 25 – 29 августа 1986 г. М.: ГКАЭ СССР, 1986. 86 с.
2. Chernobyl Reactor Accident: Report of a Consultation 6 May 1986 (provisional) // World Health Organization. ICP/CEH 129. Copenhagen, 1986. 37 p.
3. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. 1986. Т. 61, Вып. 5. С. 301–320.
4. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Северов Д.А. Моделирование радиоактивных выпадений в ближней зоне от аварии на ЧАЭС // Метеорология и гидрология. 1987. N 7.
5. Асмолов В.Г., Боровой А.А., Демин В.Ф., и др. Авария на Чернобыльской АЭС: год спустя // Атомная энергия. 1988. Т. 64, Вып. 1. С. 3–23.
6. Begichev S.N., Borovoj A.A., Burlakov E.V., et al. Radioactive releases due to the Chernobyl accident // Fission Product Transport Process in Reactor Accidents: International Seminar, Dubrovnik, 22 – 26 may 1989 y. Dubrovnik, 1989. 37 p.
7. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Под ред. Ю.А. Израэля. Ленинград: Гидрометеоздат, 1990. 296 с.
8. Международный чернобыльский проект. Оценка радиологических последствий и защитных мер // Доклад Международного консультативного комитета. МАГАТЭ, Вена, 1992. С. 83–92
9. Borzilov V.A., Klepikova N.V. Effect of Meteorological Conditions and Release Compositions on Radionuclide Deposition After Chernobyl Accident // The Chernobyl Papers. V. 1. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies / by S.E. Merwin, M.I. Balonov Editors // Research Enterprises, 1993. - P. 47–68.
10. Международный Чернобыльский проект. Оценка радиологических последствий и защитных мер // Доклад

- Международного консультативного комитета. IAEA, Вена, 1992. 740 с.
11. Stannard J.N. Radioactivity and health – a history / Ed. R.W. Baalman. Siattle: Pathific Northwest Laboratory, 1988. P. 641-651.
 12. Grinborg J.E., Linborg L., Tilikidis A. Dosimetry around Hot Particles with microdosimetric Techniques // National Institute of Radiation Protection: Preprint. Stockholm, 1988. 21 p.
 13. Меленевский А.Э. "Горячие" частицы – продукты аварии на Чернобыльской АЭС и их онкогенная опасность // Докл. АН Украины, 1992. № 1. С. 138-143.
 14. Burkart W. Dose and health implications from particulate radioactivity (hot particles) in the environment // Hot particles from Chernobyl fallout: Proceeding of an international workshop, Theuern, 28-29 Oct. 1987. Vienna.: IAEA, 1987. P. 121-130.
 15. Hofmann W., Crawford-Brown D.J., Martonen T.B. The radiological significance of beta emitting hot particles released from Chernobyl nuclear power plant // Radiation Protection Dosimetry. 1988. V. 22, N 3. P. 149-157.
 16. Demchuk V.V., Voytsekhovich O.V., Kashparov V.A., Viktorova N.V., Laptev G.V. Analysis of Chernobyl fuel Particles and their migration Characteristics in Water and Soil // Seminar on Comparative Assessment of Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl: Luxemburg, 1-5 October 1990. Luxemburg, 1991. V. 1. P. 493-514.
 17. Falk R., Suomela J., Kerekes A.A. Study of Hot Particles collected in Swiden one year after Chernobyl Accident // Journal of Aerosol Science. 1988. P. 1339-1342.
 18. Бондаренко О.А., Лось И.П., Зеленский А.В. Распространенность горячих частиц на территории УССР после аварии на ЧАЭС // Тез. докл. I Всесоюз. радиобиол. съезда, Москва, 21-27 авг. 1989. М.: Б.и., 1989. Т. 2. С. 476.
 19. Likhtaryov I.A., Repin V.S., Bondarenko O.A. and Nechaev S.Yu. Radiological effects after inhalation of highly radioactive fuel particles produced by the Chernobyl accident // Radiation Protection Dosimetry. Volume 59. № 4, P. 247–254.
 20. The International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). 1994.
 21. Charles M.W., Mill A.J., Darley P.J. Carcinogenic risk of hot-particle exposures // Radiation Protection Dosimetry. 2003. Vol. 23, № 1. P. 5–28
 22. Charles M.W., Harrison J.D. Hot particle dosimetry and radiobiology-past and present // Journal of Radiological Protection. 2007. Vol. 27, № 3a. P. 97-109.
 23. Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. ICRP Supporting Guidance 3. Ann. ICRP. 2002. 32 (1-2).
 24. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP. 2015. 44(2).
 25. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP. 1990. 20 (2).
 26. Cross W.G., Freedman N.O., Wong P.Y. Beta-ray Dose Distributions from Point Sources in an Infinite Water Medium // Health Physics. 1992. Vol. 63, № 2. P. 160-171.
 27. James A.C., Gehr P., Masse R., et al. Dosimetry Model for Bronchial and Extrathoracic Tissues of the Respiratory Tract // Radiation Protection Dosimetry. 1991. Vol. 37, № 4. P. 221–230.
 28. A. Birchall, M.R. Bailey, A.C. James. LUDEP: A Lung Dose Evaluation Program // Radiation Protection Dosimetry. 1991. Vol. 38, Issue 1-3. P. 167–174.
 29. Fedorovich G.V. Model of pulmonary mucociliary clearance // Pulmonology. 2016. Vol. 26, № 2. P. 222-230.

Поступила: 04.08.2021 г.

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Repin@mail.ru

Для цитирования: Репин В.С. Модель расчета доз бета-облучения клеток трахеобронхиального отдела при движении точечного источника // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 6-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-6-17

A model for calculating beta exposure doses to tracheobronchial cells during movement of a point source

Victor S. Repin

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

The article describes a model and method for calculating beta-exposure doses to secretory and basal cells of the tracheobronchial part of the respiratory tract when a point source of 1 Bq activity moves along the inner surface of respiratory formations. The calculations, that used for proposed model, were performed by using a ^{90}Y point source as an example. The dose calculation model takes into account the speed of movement of the radiation source in each respiratory formation, the size of the respiratory formations, and the depth of the secretory and basal cells. The dose calculation is based on the dose rate attenuation functions published by W.G. Cross et al. (DOI: 10.1097/00004032-199208000-00002). The calculations were performed for a cylindrical model of a respiratory formation. Two kinds of cells were considered for the dose estimation: cells irradiated without beta-particle exit into bronchial lumen (type 1 cells) and cells irradiated due to beta-particle exit into bronchial lumen (type 2 cells). The results of calculations showed, that as far as the generation number increasing, the average irradiation doses of the type 1 cells are 10 or more times greater than those of the type 2 cells. With increasing generation number in the tracheobronchial tree, doses per cells increase by several orders of magnitude. The highest doses are formed in bronchioles of generations 9-15, reaching units and tens of mGy. In spite of the fact that the number of generation increases, the total number of irradiated cells decreases, the collective doses of irradiated cells (sum of doses to all cells of the respiratory formation) in the last generations are 30-50 times higher than the doses of the first generations. Thus, in case of a single point source, there is a significant (by many orders of magnitude) scatter of doses to individual cells in individual respiratory formation, as well as significant differences in average doses of trachea, individual bronchi and bronchioles.

Key words: Chernobyl accident, respiratory tract, secretory cells, basal cells, hot particles, beta-radiation doses.

References

1. Chernobyl accident and its consequences: Information. Meeting of IAEA experts, Vienna, August 25 – 29, 1986. Moscow: GKAE USSR, 1986. 86 p. (In Russian).
2. Chernobyl Reactor Accident: Report of a Consultation 6 May 1986 (provisional). World Health Organization. ICP/CEH 129. Copenhagen; 1986. 37 p.
3. Information on the Chernobyl accident and its consequences, prepared for the IAEA. *Atomic Energy*. 1986;61(5): 301-320 (In Russian).
4. Izrael YuA, Petrov VN, Severov DA. Modeling of radioactive fallout in the near zone from the Chernobyl accident. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 1987. N 7 (In Russian).
5. Asmolov VG, Borovoy AA, Demin VF, et al. The accident at the Chernobyl nuclear power plant: a year later. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 1988;64(1): 3-23 (In Russian).
6. Begichev SN, Borovoy AA, Burlakov EV, et al. Radioactive releases due to the chernobyl accident. Fission Product Transport Process in Reactor Accidents: International Seminar, Dubrovnik, 22 – 26 may 1989 y. Dubrovnik; 1989. 37 p.
7. Chernobyl: radioactive contamination of natural environments. Ed. by YuA. Izrael. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1990. 296 p. (In Russian).
8. International Chernobyl Project. Assessment of Radiological Consequences and Protective Measures. Report of the International Advisory Committee. IAEA, Vienna; 1992. P. 83-929 (In Russian).
9. Borzilov VA, Klepikova NV. Effect of Meteorological Conditions and Release Compositions on Radionuclide Deposition After Chernobyl Accident. The Chernobyl Papers. V. 1. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies / Ed by SE. Merwin, MI. Balonov. *Research Enterprises*; 1993. P. 47-68.
10. International Chernobyl Project. Assessment of Radiological Consequences and Protective Measures. *Report of the International Advisory Committee*. IAEA, Vienna; 1992. 740 p. (In Russian).
11. Stannard JN. Radioactivity and health – a history. Ed. RW. Baalman. Seattle: Pathific Northwest Laboratory; 1988. P. 641-651.
12. Grinborg JE, Linborg L, Tilikidis A. Dosimetry around Hot Particles with microdosimetric Techniques. National Institute of Radiation Protection: Preprint. Stockholm; 1988. 21 p.
13. Melenevsky AE. "Hot" particles – products of Chernobyl accident and their oncogenic danger. Proceedings of Academy of Sciences of Ukraine. 1992;1: 138-143. (In Russian).
14. Burkart W. Dose and health implications from particulate radioactivity (hot particles) in the environment. Hot particles from Chernobyl fallout: Proceeding of an international workshop, Theuern, 28-29 Oct. 1987. Vienna.: IAEA; 1987. P. 121-130.
15. Hofmann W, Crawford-Brown DJ, Martonen TB. The radiological significance of beta emitting hot particles released

Victor S. Repin

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: V.Repin@mail.ru

- from Chernobyl nuclear power plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 1988;22(3): 149-157.
16. Demchuk VV, Voytsekhovich OV, Kashparov VA, Viktorova NV, Laptev GV. Analysis of Chernobyl fuel Particles and their migration Characteristics in Water and Soil. Seminar on Comparative Assessment of Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl: Luxemburg, 1-5 October 1990. Luxemburg; 1991;1: 493-514.
 17. Falk R, Suomela J, Kerekes AA. Study of Hot Particles collected in Sweden one year after Chernobyl Accident. *Journal of Aerosol Science*. 1988. P. 1339-1342.
 18. Bondarenko OA, Los IP, Zelensky AV. Prevalence of hot particles on the territory of USSR after Chernobyl accident. Proceedings of I All-Union Radiobiol. Congress, Moscow, 21-27 Aug. 1989, Moscow: B.I., 1989. Vol. 2. 476 p. (In Russian).
 19. Likhtaryov IA, Repin VS, Bondarenko OA, Nechaev SYu. Radiological effects after inhalation of highly radioactive fuel particles produced by the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 59(4): 247-254.
 20. The International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP. 1994 24 (1-3).
 21. Charles MW, Mill AJ, Darley PJ. Carcinogenic risk of hot-particle exposures. *Journal of Radiological Protection*. 2003;23(1): 5-28.
 22. Charles MW, Harrison JD. Hot particle dosimetry and radiobiology-past and present. *Journal of Radiological Protection*. 2007;27(3a): 97-109.
 23. Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. ICRP Supporting Guidance 3. Ann. ICRP. 2002;32(1-2).
 24. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP. 2015;44(2).
 25. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP. 1990. 20(2).
 26. Cross WG, Freedman NO, Wong PY. Beta-ray Dose Distributions from Point Sources in an Infinite Water Medium. *Health Physics*. 1992;63(2):160-171.
 27. James AC, Gehr P, Masse R, Cuddihy RG, Cross FT, Birchall A, et al. Dosimetry model for bronchial and extrathoracic tissues of the respiratory tract. *Radiation Protection Dosimetry*. 1991;37(4): 221-230.
 28. Birchall A, Bailey MR, James AC. LUDEP: A Lung Dose Evaluation Program. *Radiation Protection Dosimetry*. 1991;38(1-3): 167-174.
 29. Fedorovich GV. Model of pulmonary mucociliary clearance. *Pulmonology*. 2016;26(2): 222-230.

Received: August 04, 2021

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)

For citation: Repin V.S. A model for calculating beta exposure doses to tracheobronchial cells during movement of a point source. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3, P. 6-17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-6-17