

константа радиационного разложения, рассчитанная по изменению концентрации с временем облучения при мощности дозы 0,2—1,2 Гр/с, для уксусной кислоты не зависит от температуры и составляет $1,25 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, в случае азотной кислоты для 80, 130 и 170 °С равна $0,9 \cdot 10^{-3}$, 10^{-3} , $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ соответственно.

Полученные в работе суммарные эффекты радиационного и термического воздействия на нитратно-ацетатные растворы позволяют рассчитывать кинетику разложения азотной и уксусной кислот с учетом условий глубоких хранилищ жидких радиоактивных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАт, 1994, с. 256.
2. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Радиолит газы и жидкостей. М.: Наука, 1986, с. 211, 373.
3. Стельмах Н.С., Крицкая В.Е., Бывшева И.И. и др. Исследование радиолитического газообразования в азотно-кислых и уксусно-кислых растворах. — Химия высоких энергий, 1997, т. 31, № 6, с. 405—407.

Поступила в Редакцию 27.02.02

УДК 614.876—614.73:611.441

РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗЫ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ^{131}I ПО ПЛОТНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫПАДЕНИЙ ^{137}Cs

Прокофьев О.Н. (НИИ радиационной гигиены)

Для ретроспективного определения дозы внутреннего облучения щитовидной железы человека в условиях локальных выпадений вследствие ядерных взрывов разработаны методические указания [1]. В этом документе исходным параметром является мощность экспозиционной дозы на местности, измеренная непосредственно после взрыва. К сожалению, такие измерения не проводили после каждого взрыва, а когда проводили, то они охватывали ограниченное число населенных пунктов. Мощность экспозиционной дозы на местности можно также прогнозировать исходя из параметров взрыва, а также метеорологической обстановки. Этот путь определения мощности экспозиционной дозы, следовательно, и дозы облучения щитовидной железы может сопровождаться большими погрешностями и даже промахами из-за недостаточности информации о метеорологической обстановке на большой территории, где происходили локальные радиоактивные выпадения. Все это указывает, что возможности ретроспективного определения дозы облучения щитовидной железы человека с помощью методических указаний [1] ограничены. Для расширения этих возможностей целесообразно развить другой подход.

К настоящему времени получена обширная информация о плотности выпадений ^{137}Cs на почве на радиоактивных следах ядерных взрывов, проведенных на Семипалатинском полигоне. В методических указаниях [2] дана методика определения составляющей плотности ^{137}Cs на почве, обусловленной локальными выпадениями. До настоящего времени такую информацию использовали для ретроспективного определения дозы внешнего облучения населения Алтайского края. Вместе с тем плотность локальных выпадений ^{137}Cs позволяет определить и плотность локальных выпадений ^{131}I , обусловившего внутреннее облучение щитовидной железы при его поступлении с пищевыми продуктами, прежде всего со свежим молоком. По плотности на момент выпадения ^{137}Cs можно определить плотность на момент выпадения ^{131}I по соотношению [3]

$$P_1(x) = \frac{S_1 + xV_1}{S_{Cs} + xV_{Cs}} P_{Cs}(x), \quad (1)$$

где $P_1(x)[P_{Cs}(x)]$ — плотность на момент выпадения ^{131}I , ^{137}Cs , ат./м²; x — безразмерный параметр отклонения для рассматриваемого пункта земной поверхности (в основном зависит от удаления пункта от места взрыва); S_1 , S_{Cs} — число атомов ^{131}I , ^{137}Cs на поверхности выпавших частиц на 100 дел.; V_1 , V_{Cs} — число атомов ^{131}I , ^{137}Cs в объеме расплава выпавших частиц на 100 дел.

Для биологического усвоения доступны только те атомы ^{131}I , которые конденсированы на поверхности. Поэтому при определении плотности выпадения только таких атомов ^{131}I по плотности выпадения атомов ^{137}Cs в соотношении (1) следует принять $V_1 = 0$. Атомы ^{137}Cs преимущественно конденсируются на поверхности частиц. Расчет, выполненный по методике [3], показал, что отношение S_{Cs}/V_{Cs} превышает 2000. Параметр отклонения на радиоактивном следе имеет следующие значения: 5 на расстоянии около 300 км и 1,8 на расстоянии 1600 км. Поэтому на всем расстоянии на радиоактивном следе $S_{Cs} \gg xV_{Cs}$, и слагаемым xV_{Cs} в знаменателе формулы (1) можно пренебречь. Тогда плотность выпадений атомов ^{131}I , доступных для биологического усвоения, можно определять по плотности выпадений атомов S_{Cs} с помощью соотношения

$$P_1 = P_{Cs} S_1 / S_{Cs}. \quad (2)$$

Расчет по методике [3] дал следующие оценки отношения S_1/S_{Cs} : 0,48 при мгновенном делении ^{239}Pu нейтронами деления и 0,46 при мгновенном делении ^{238}U быстрыми нейтронами. По результатам натурных наблюдений, выполненных в 40 населенных пунктах США для пяти серий ядерных взрывов [4], среднее арифметическое значение отношения S_1/S_{Cs} составило 0,46 при максимальном 0,57 и минимальном 0,35. Таким образом, в оценке отношения S_1/S_{Cs} имеется хорошее согласие теоретического расчета с результатами натурных наблюдений.

Как свидетельствуют результаты исследований [5], определяющий вклад в радиационное воздействие на население Алтайского края оказали наземные взрывы 29.08.49 г., 12.08.53 г., 29.07.55 г., 24.08.56 г. и 7.08.62 г., проведенные в пастбищный сезон. Регистрируемая плотность выпадений ^{137}Cs на почве является результатом локальных выпадений от взрывов, обусловивших вклад в эти выпадения, и глобальных. Из-за длительного периода полураспада (30 лет) происходит наложение локальных выпадений от взрывов, проведенных в разное время. ^{131}I имеет сравнительно короткий период полураспада (8,04 сут). Выпавший на земную поверхность от одного взрыва, он распадается к моменту проведения следующего взрыва, если временной интервал между взрывами превышает 2 мес. И в действительности выпадения ^{131}I на почве не суммируются. Однако для расчета дозы внутреннего облучения щитовидной железы от поступления ^{131}I со свежим молоком целесообразно использовать суммарные выпадения, которые равны сумме плотностей выпадения ^{131}I на момент каждого взрыва. Именнo суммарные выпадения ^{131}I определяются исходя из суммарных выпадений ^{137}Cs по формуле (2).

Доля частиц выпадений F , удерживаемых травой, зависит от их размера и плотности травяного покрова и определяется по формуле [6]. Концентрация ^{131}I на траве

снижается с течением времени вследствие распада и других процессов, включая прирост свежей травы. С учетом этого изменение с течением времени концентрации ^{131}I на траве можно описать формулой

$$C_I(t) = P_{Cs} \frac{S_I}{S_{Cs}} \frac{F}{m} \exp \left[-\lambda_I t_b - (\lambda_I + \lambda_n) t \right],$$

где t_b — момент выпадения радиоактивных осадков в рассматриваемом пункте земной поверхности (отсчитывается от момента взрыва), сут; t — время, отсчитываемое от момента выпадения, сут; m — масса травы на 1 м^2 пастбища, (кг сухой массы)/ м^2 ; $\lambda_I = 0,0865 \text{ сут}^{-1}$ — постоянная распада ^{131}I ; $\lambda_n = 0,025 \text{ сут}^{-1}$ — постоянная экспоненты, описывающей снижение с течением времени концентрации ^{131}I на траве вследствие прироста молодой травы [7].

Поскольку процесс перехода к установившемуся состоянию между концентрацией ^{131}I в корме и молоке короткий (около 3 сут [7]) по сравнению с продолжительностью перорального поступления (около 60 сут) ^{131}I с молоком, то достаточно ограничиться рассмотрением установившегося состояния. В этом случае удельную активность ^{131}I в молоке можно рассчитать по формуле

$$a_I(t) = \lambda_I C_I(t) M k,$$

где M — масса травы, потребляемой коровой за 1 сут, кг сухой массы/сут; $M = 20 \text{ кг/сут}$ [7]; $k = 0,01 \text{ сут/л}$ — коэффициент перехода радионуклида из суточного корма в 1 л молока [8].

Если потребление молока начато через t_0 сут после выпадения радионуклидов на пастбище и продолжается более 2 мес, то поступление ^{131}I с молоком определяется интегралом

$$\Pi_I(t_0) = V \int_{t_0}^{\infty} a_I(t) dt,$$

где V — суточное потребление молока, л/сут.

После интегрирования и умножения поступления ^{131}I на дозовый коэффициент получена формула для расчета эффективной дозы, обусловленной облучением щитовидной железы от поступлений ^{131}I со свежим коровьим молоком, по плотности локальных выпадений ^{137}Cs на 1 м^2 земной поверхности:

$$D_I(t_0) = 1,36 \cdot 10^3 V d \frac{a_{Cs}}{\lambda_I + \lambda_n} \frac{F}{m} \frac{S_I}{S_{Cs}} M k \exp \left[-\lambda_I t_b - (\lambda_I + \lambda_n) t_0 \right], \quad (3)$$

где d — дозовый коэффициент для перорального поступления ^{131}I , мЗв/Бк; a_{Cs} — плотность ^{137}Cs локальных выпадений на 1 м^2 земной поверхности в единицах активности, Бк/ м^2 .

Суточное потребление молока в соответствии с официально принятыми условиями составляет 0,7 л для детей и 1 л для взрослых [9]. Дозовый коэффициент $d = 1,79 \cdot 10^{-4}$ мЗв/Бк для детей в возрасте 1 года и $2,17 \cdot 10^{-5}$ мЗв/Бк для взрослых [10]. Для степного разнотравья масса сухой травы на 1 м^2 пастбища $m = 0,168 \text{ кг/м}^2$ [7]. Населенные пункты, для которых определена плотность локальных выпадений ^{137}Cs , удалены от эпицентра взрыва на 300—400 км. Согласно данным работы [6] для расстояния 300 км доля $F = 0,07$, 400 км — $F = 0,1$. Для всех рас-

смаатриваемых населенных пунктов принято $F = 0,1$, $t_b = 0,167$ сут (4 ч), $t_0 = 2$ сут.

Инструментально определенная плотность выпадений ^{137}Cs на почве в населенных пунктах Алтайского края по состоянию на 1992 г. заимствована из работ [11—15]. Из суммарной плотности выпадений ^{137}Cs на почве вычтена глобальная составляющая, которая была взята из табл. 3 [13], в случае отсутствия в табл. 3 была рассчитана по формуле (2) этой же работы на основе информации о среднегодовой интенсивности атмосферных осадков для рассматриваемого населенного пункта. Полученная локальная составляющая плотности выпадений ^{137}Cs на почве с учетом распада пересчитана с 1992 г. на 1949 г., так как установлено, что основной вклад в радиационное воздействие на население Алтайского края оказали наземные взрывы 29 августа 1949 г. и 12 августа 1953 г. (см. таблицу). Плотность выпадений ^{137}Cs на почве использована для расчета по формуле (3) эффективной дозы поступления ^{131}I с молоком для взрослого населения и детей в возрасте 1 года, проживавших на территории Алтайского края во время проведения испытательных ядерных взрывов.

**Оценка эффективной дозы облучения щитовидной железы детей
и взрослых в результате поступления ^{131}I со свежим коровьим молоком, сЗв**

Населенный пункт	Плотность выпадений ^{137}Cs (1949 г.), кБк/м ²	Дети в возрасте 1 года	Взрослые
Варшана	5,59 [11]	36,7 (27,3)	6,36 (19)
Саввушка	11,8 [12]	77,4 (9,8)	13,4 (7)
Таловка	5,3 [11]	34,7 (25)	6,0 (18)
Ивановка	3,1 [12]	20,4 (16)	3,5 (11)
Краснознаменский	0,4 [12]	2,6 (10)	0,45 (7,5)
Курья	3,7 [12]	24,3 (13)	4,2 (9,5)
Усть-Таловка	5,4 [12]	35,4 (11)	6,1 (8)
Локоть	2,0 [13]	13,1	2,3
	7,3 [11]	48,0 (56)	8,3 (40)
	4,9 [14]	32,2	5,6
Самарка	5,2 [14]	34,0 (8,4)	5,9 (6)
Веселоярск	22,1 [14]	139 (27)	24 (19)
	2,0 [13]	13,1	2,3
Новониколаевка	1,5 [15]	9,8 (34)	1,7 (24)
Беленькое	0,9 [13]	5,9	1,0
	8,2 [15]	54 (27)	9,3 (20)
Лаптев Лог	9,3 [14]	61 (23)	10,6 (17)
	0,3 [13]	2,0	0,34
Наумовка	16,8 [14]	110 (105)	19 (75)
	8,5 [11]	55,7	9,7
	3,8 [15]	25	4,3
Топольное	15,5 [14]	102 (98)	17,6 (70)
	9,3 [13]	61	10,6
	10,5 [11]	69	12
	9,0 [15]	59	10

Оценки поглощенной дозы облучения щитовидной железы детей и взрослых в населенных пунктах Алтайского края от поступления ^{131}I с молоком, обусловленного локальными выпадениями, ранее были получены в работе [16]. Нами они были пересчитаны на принятый в настоящее время объем суточного потребления молока 0,7 л ребенком и 1 л взрослым. Затем выполнен переход к эффективной дозе с использованием коэффициента, взвешивающего риск и равного 0,05. Полученные оценки эффективной дозы приведены в таблице в скобках. Сравнение оценок оказалось воз-

можным для 15 населенных пунктов. Различие в оценке дозы менее чем в 2 раза отмечено в девяти случаях для детей и в четырех для взрослых.

Исходя из поглощенной дозы [16] и принятых условий потребления молока [7], эффективная доза для ребенка превышает эффективную дозу для взрослого в 1,4 раза. В то же время с учетом принятых в настоящее время дозовых коэффициентов для детей и взрослых [10] и условий потребления молока [7] рассматриваемое отношение составляет 5,8. Если с помощью этого отношения перейти от дозы для детей, полученной в работе [16], к дозе для взрослых, то последняя значительно лучше согласуется с рассчитанной по выпадениям ^{137}Cs на почве. Различие в оценке дозы для взрослых менее чем в 2 раза наблюдалось для семи населенных пунктов.

В большинстве случаев оценки плотности выпадений ^{137}Cs для одного и того же населенного пункта, полученные в разных работах, удовлетворительно согласуются (см. Локоть, Наумовка, Топольное). Это подтверждает возможность оценки эффективной дозы облучения щитовидной железы вследствие поступления ^{131}I с молоком по плотности выпадений ^{137}Cs на почве.

Предлагаемая методика позволяет ретроспективно оценить эффективную дозу внутреннего облучения детей и взрослых от поступления ^{131}I с молоком в населенных пунктах, где есть или может быть получена информация о плотности локальных выпадений ^{137}Cs от ядерных взрывов. В результате можно существенно дополнить информацию о радиационной обстановке, складывавшейся в регионах России при проведении испытательных ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реконструкция доз внутреннего облучения щитовидной железы радиоизотопами йода у населения, проживающего в зонах локальных выпадений ядерных взрывов. МУ 2.6.1.039-95. — Вестник научной программы «Семипалатинский полигон — Алтай», 1995, № 4, с. 52—67.
2. Определение эффективных доз внешнего облучения от локальных выпадений ядерных взрывов по величине осадка цезия-137 на почве. МУ 2.6.1.040-95.
3. Prokof'ev O.N., Smirnov O.A. Retrospective determination of doses from local fallout of nuclear explosions. — In: 10th Intern. Congress of IRPA, May 14—19, 2000, Hiroshima, Japan, p. 4b-224.
4. Beck H., Helfer J., Bouville A., Dreicer M. Estimates of fallout in the continental US from Nevada weapons testing based on gummed — film monitoring data. — Health Physics, 1990, v. 59, № 5, p. 565—576.
5. Шойхет Я.Н., Лоборов В.М., Киселев В.И. и др. Радиационное воздействие Семипалатинского полигона на Алтайский край. — Вестник научной программы «Семипалатинский полигон — Алтай», 1996, № 1, с. 7—25.
6. Simon S.L. An analysis of vegetation interception data pertaining to close-in weapons test fallout. — Health Physics, 1990, v. 59, № 5, p. 619—626.
7. Гордеев К.И., Лебедев А.Н., Савкин М.Н. Метод ретроспективного восстановления параметров радиационной обстановки, определяющих внутреннее облучение населения на следе ядерного взрыва. — Вестник научной программы «Семипалатинский полигон — Алтай», 1994, № 1, с. 57—96.
8. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments. Techn. Rep. Ser. № 364. Vienna: IAEA, 1994.
9. Вероятные дозы внутреннего облучения щитовидной железы у населения Алтайского края, подвергшегося радиационному воздействию ядерного взрыва, осуществленного на Семипалатинском полигоне 7 августа 1962 года. — Вестник научной программы «Семипалатинский полигон — Алтай», 1995, № 4, с. 68—69.
10. Generalised derived limits for radioisotopes of strontium, ruthenium, iodine, caesium, plutonium, americium and curium. — NRPB, 1996, v. 7, № 1, p. 5.
11. Бобовникова Ц.И., Газиев Я.И., Назаров Л.Е. и др. Выявление радиоактивного загрязнения на территории Алтайского края, обусловленного испытаниями ядерного оружия на Семипалатинском полигоне. — В сб.: Ядерные испытания, окружающая среда и здоровье населения Алтайского края, т. 1, кн. 1. Барнаул, 1993, с. 29.
12. Гавшин В.М., Сухоруков Ф.В., Маликова И.Н. и др. Распределение радионуклидов на территории Алтайского края. — Там же, с. 49.
13. Бастрон С.Г., Гончаров А.И., Кайгородов А.В. и др. Запас цезия-137 в почве. — Там же, с. 76—78.

14. Прокофьев О.Н., Колотвин В.А., Коваленко В.И. и др. Радиационно-гигиеническая обстановка в Алтайском крае от выпадений стронция-90 и цезия-137. — Там же, с. 95.
15. Гудошников Ю.В., Дьяченко В.И., Митюнин А.И. Расчет доз гамма-излучения на радиоактивном следе по выпадениям цезия-137 и стронция-90. — Там же, с. 133.
16. Логачев В.А., Степанов Ю.С., Даренская Н.Г. и др. Оценка радиационной обстановки на территории Алтайского края и ее влияние на состояние здоровья населения Алтайского края. — Там же, с. 72.

Поступила в Редакцию 17.05.02

УДК 551.21:539.16

ПОИСК КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ПРИ РАСЧЕТЕ РАССЕЯНИЯ ВЫБРОСОВ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ

Брыкин С.Н., Марковский В.В. (ГУП ВНИИХТ)

С 1 июля 1999 г. в нашей стране введено в действие Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу ДВ-98. Этот документ определяет основные требования к расчету допустимых выбросов радионуклидов в атмосферу, а также вспомогательных и производных нормативов: допустимой концентрации радионуклидов в атмосферном воздухе, допустимых отложений на почву, предельно допустимых выбросов, допустимых норм выброса.

В ДВ-98 расчеты всех величин основаны на Гауссовой модели диффузии примеси в атмосфере, которая с точки зрения представительности получаемых результатов при разумной простоте и доступности входных параметров — вне конкуренции и по этой причине наиболее широко используется. Наряду с Гауссовой есть и другие теории и модели рассеяния примеси в атмосфере. Однако большинство из них требует труднодоступных на практике параметров, как правило, охватывающих весь пограничный слой атмосферы. Главным образом именно эта необеспеченность входными параметрами не позволяет широко использовать теоретически более привлекательные, чем Гауссова, модели рассеяния. Наконец, не на последнем месте стоит вопрос об адекватности применяемых моделей. Сложность процессов атмосферной диффузии такова, что любые, самые совершенные и современные модели пока все еще являются грубой идеализацией реальных атмосферных процессов.

В ДВ-98 вводится понятие фактора безопасности как меры, характеризующей благополучие населения и окружающей среды с точки зрения радиационного воздействия выбросов. Фактор безопасности равен левой части соотношения безопасности и является фактически реализуемой в данной точке местности долей предела дозы облучения:

$$\sum_k \left[\frac{H_{ext}^r}{\text{ПД}} + \sum_i \frac{C_V^r}{\text{ДК}^{r,i}} + \sum_j \frac{C_S^r}{\text{ДО}^{r,j}} \right] \leq \delta \leq 1,$$

где H_{ext}^r — реальная годовая доза внешнего облучения от облака r -го радионуклида, Зв; C_V^r — реальная среднегодовая объемная активность (концентрация) r -го радионуклида в воздухе, Бк/м³; C_S^r — реальное среднегодовое отложение r -го радионуклида на почву, Бк/(год·м²); ПД — предел дозы; $\text{ДК}^{r,i}$, $\text{ДО}^{r,j}$ — допустимая концентрация r -го радионуклида в воздухе для i -го пути облучения, Бк/м³ и допустимое отложение этого радионуклида на почву для j -го пути облучения, Бк/(год·м²); δ — выделенная дозовая квота.

Как следствие при проведении расчетов в соответствии с ДВ-98 важную роль играет точное определение критической точки местности: точка, в которой реализуются наибольшие значения фактора безопасности, вычисленного с учетом времени пребывания