

Зонирование территории радиоактивного следа

О.Н. Прокофьев

ФГУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург

Метод предназначен для выполнения зонирования радиоактивного следа аварийного выброса по величине мощности эффективной дозы над земной поверхностью на тот или иной момент времени после выброса. Учитывается фактический состав радионуклидов, выпавших на земную поверхность. Метод позволяет определять положение на местности границ зон радиационного контроля, ограниченного проживания, отселения и отчуждения по величине мощности эффективной дозы над земной поверхностью на тот или иной момент времени после выброса. Это дает возможность осуществлять зонирование радиоактивного следа с того момента, как будет определен состав радионуклидов, выпавших на земную поверхность, не дожидаясь набора годовых доз. В результате можно своевременно, т.е. до того, как населением будут получены дозы, приступить к проведению защитных мероприятий на территории радиоактивного следа в соответствии с уровнями ожидаемых доз.

Ключевые слова: аварийный выброс, радиоактивный след, эффективная доза, зонирование.

Авария на атомном объекте может сопровождаться значительным выбросом радионуклидов в атмосферу. Осаждение радионуклидов на землю приводит к образованию радиоактивного следа с повышенной мощностью дозы γ -излучения над земной поверхностью. Пребывание людей на территории радиоактивного следа обуславливает их дополнительное облучение выше фоновых уровней. В этом случае должны применяться профилактические и защитные мероприятия, адекватные складывающейся обстановке. Принятию решений о проведении защитных мер населения помогает осуществление зонирования территории радиоактивного следа по величине ожидаемых доз внешнего γ -облучения.

Наиболее вероятна ситуация, когда зонирование радиоактивного следа невозможно выполнить до того, как произошла авария и осуществлены радиоактивные выпадения, т.к. состав радионуклидов аварийного выброса заранее неизвестен и может сильно изменяться в зависимости как от объекта, явившегося источником выброса, так и от характера выброса. Как правило, состав радионуклидов, выпавших на земную поверхность, может быть определен только после того, как произошел выброс и сформировался радиоактивный след. В связи с этим требуется метод, который позволяет выполнить зонирование радиоактивного следа на основе фактических данных о составе радионуклидов, выпавших на земную поверхность.

Работа посвящена решению задачи зонирования территории радиоактивного следа по величине мощности эффективной дозы над земной поверхностью спустя то или иное время после аварийного выброса. Снижение с течением времени мощности эффективной дозы от радионуклида, выпавшего на земную поверхность, обуславливают радиоактивный распад и миграция (вертикальная и горизонтальная) атомов радионуклида в почве под воздействием природных процессов. Миграция радионуклида в почве протекает

сравнительно медленно и может внести заметный вклад в снижение мощности дозы над земной поверхностью на временном интервале в несколько лет. В то время как для обеспечения радиационной безопасности после аварии наиболее ответственным является первый год. В течение первого года влияние на снижение мощности эффективной дозы над земной поверхностью процессов вертикальной и горизонтальной миграции атомов радионуклида, выпавших на почву, незначительно и его можно не учитывать. В этом случае для получения консервативных оценок ожидаемых доз на рассматриваемом временном интервале снижение с течением времени мощности эффективной дозы над земной поверхностью от осадка на почве радионуклида i можно описать с помощью формулы, учитывающей только радиоактивный распад:

$$P_i(t) = \sigma_i(0) \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot G_i = \sigma_i(t) \cdot G_i, \quad (1)$$

где: $P_i(t)$ – мощность эффективной дозы, мЗв/сутки; $\sigma_i(0)$ ($\sigma_i(t)$) – поверхностная активность радионуклида i на почве в нулевой момент (момент t), кБк/м²; λ_i – постоянная распада радионуклида i , (сут⁻¹); t – интервал времени, прошедший от момента выпадения радионуклида на почву, суток; G_i – коэффициент для перехода от плотности осадка радионуклида i на почве к мощности эффективной дозы, (мЗв·м²)/(сутки·кБк).

Величины коэффициентов G_i , полученные в работе [1] для радионуклидов γ -излучателей, приведены в таблице.

Путем интегрирования мощности эффективной дозы σ -облучения (1) над земной поверхностью по времени от нулевого момента ($t=0$) до момента T суток, получена формула для расчета вклада в дозу за этот временной интервал от осадка на земной поверхности радионуклида i :

$$D_i(0;T) = \sigma_i(t) \cdot G_i \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot (1 - e^{-\lambda_i T}) \cdot \frac{1}{\lambda_i}.$$

Коэффициенты G_i в $(\text{мЗв}\cdot\text{м}^2)/(\text{сутки}\cdot\text{кБк})$ для перехода от плотности осадка радионуклида i на почве к мощности эффективной дозы

Радионуклид	G_i	Радионуклид	G_i	Радионуклид	G_i
^{60}Co	$138\cdot 10^{-6}$	^{126}Sb	$164\cdot 10^{-6}$	^{140}La	$130\cdot 10^{-6}$
^{91}Sr	$57\cdot 10^{-6}$	^{127}Sb	$40,6\cdot 10^{-6}$	^{141}Ce	$4,3\cdot 10^{-6}$
^{97}Zr	$86,4\cdot 10^{-6}$	$^{123\text{m}}\text{Te}$	$8,6\cdot 10^{-6}$	^{143}Ce	$15,6\cdot 10^{-6}$
^{95}Nb	$44\cdot 10^{-6}$	$^{131\text{m}}\text{Te}$	$104\cdot 10^{-6}$	^{144}Ce	$2,9\cdot 10^{-6}$
^{99}Mo	$15,6\cdot 10^{-6}$	^{132}Te	$138\cdot 10^{-6}$	^{147}Nd	$7,8\cdot 10^{-6}$
^{103}Ru	$26,8\cdot 10^{-6}$	^{130}I	$121\cdot 10^{-6}$	^{148}Pm	$32\cdot 10^{-6}$
^{105}Rh	$4,6\cdot 10^{-6}$	^{131}I	$22,5\cdot 10^{-6}$	$^{148\text{m}}\text{Pm}$	$112\cdot 10^{-6}$
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$155\cdot 10^{-6}$	^{133}I	$37\cdot 10^{-6}$	^{151}Pm	$18\cdot 10^{-6}$
^{124}Sb	$104\cdot 10^{-6}$	^{134}Cs	$86,4\cdot 10^{-6}$	^{152}Eu	$42,3\cdot 10^{-6}$
^{125}Sb	$25\cdot 10^{-6}$	^{136}Cs	$121\cdot 10^{-6}$	^{155}Eu	$3,4\cdot 10^{-6}$
		^{137}Cs	$32,8\cdot 10^{-6}$	^{156}Eu	$71\cdot 10^{-6}$

В условиях радиационной аварии наиболее вероятно выпадение на земную поверхность не одного, а нескольких радионуклидов. В этом случае величину ожидаемой эффективной дозы за временной интервал от 0 до T суток можно получить путем суммирования эффективных доз от всех радионуклидов γ -излучателей, выпавших на земную поверхность:

$$D(0;T) = P(t) \cdot \left[\sum_{i=1}^n \sigma_i(t) \cdot G_i \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot (1 - e^{-\lambda_i T}) / \lambda_i \right] / \sum_{i=1}^n \sigma_i(t) \cdot G_i, \quad (2)$$

где: $D(0;T)$ – эффективная доза, мЗв; $P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t)$, мЗв/сутки; n – число радионуклидов γ -излучателей, выпавших на земную поверхность.

Формула (2) дает возможность определять ожидаемую эффективную дозу за интервал от 0 до T суток по результату измерения мощности эффективной дозы в момент t и информации о составе выпавших радионуклидов на этот момент t , т.е. по исходным данным, доступным определению в тот или иной момент после выпадений. Для определения состава выпавших радионуклидов требуется отобрать пробу почвы и выполнить ее анализ. В результате на момент t анализа пробы должны быть определены величины поверхностной активности $\sigma_i(t)$ каждого радионуклида, выпавшего на земную поверхность.

Границы зон радиоактивного загрязнения установлены в НРБ-99 в шкале эффективной дозы, получаемой за 1 год [2]. Если в формуле (2) принять $T=365$ суток, а эффективную дозу за год ($D(0;365)$) принять равной дозе, установленной для границы зоны, то формула (2) позволяет рассчитать величину мощности эффективной дозы на границе соответствующей зоны на момент t ее измерения. Это дает возможность осуществлять зонирование радиоактивно загрязненной территории по величине мощности эффективной дозы над земной поверхностью, измеренной в то или иное время после аварии. В качестве контрольной целесообразно принять такую мощность эффективной дозы $P_k(t)$ на местности на момент t после аварии, при которой годовая эффективная доза составит 1 мЗв. Формулу для расчета контрольной мощности эффективной дозы в мЗв/сутки можно получить из соотношения (2), приняв в нем дозу $D(0;365)$ равной 1 мЗв:

$$P_k(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(t) \cdot G_i / \sum_{i=1}^n \sigma_i(t) \cdot G_i \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot (1 - e^{-365\lambda_i}) / \lambda_i, \quad (3)$$

Для планирования и проведения радиационной защиты населения важно иметь возможность оперативно определять, к какой зоне радиоактивного загрязнения должен быть отнесен тот или иной участок территории. Сравнение результата измерения мощности эффективной дозы $P(t)$, выполненного в момент t , с контрольной мощностью эффективной дозы $P_k(t)$ на это время позволяет решать эту задачу. Рассматриваемый участок территории должен быть отнесен к зоне: 1) отчуждения, если $P(t)/P_k(t) > 50$; 2) отселения, если $20 < P(t)/P_k(t) < 50$; 3) ограниченного проживания, если $5 < P(t)/P_k(t) < 20$; 4) радиационного контроля, если $1 < P(t)/P_k(t) < 5$. Территория, на которой отношение $P(t)/P_k(t) < 1$ не относится к зонам радиоактивного загрязнения, введенным в Приложении 5 НРБ-99.

Вследствие распада радионуклидов, выпавших на почву, мощность эффективной дозы над земной поверхностью с течением времени снижается. Поэтому каждый участок радиоактивно загрязненной территории по прошествии того или иного интервала времени переходит из зоны с более высоким уровнем предстоящей годовой эффективной дозы в зону с меньшим уровнем такой дозы. Для планирования мероприятий по радиационной защите населения на предстоящий период необходимо определять срок перехода участка территории с радиоактивным загрязнением из зоны в зону. Срок перехода рассматриваемого участка из зоны с более высоким уровнем радиоактивного загрязнения в зону с меньшим уровнем можно определять по условию, что ожидаемая эффективная доза на предстоящий год, начиная с момента перехода, составит величину, которая равна верхнему значению годовой дозы d в мЗв, установленному для зоны с меньшим уровнем радиоактивного загрязнения. Это условие можно записать в следующем виде:

$$D(0; X + 365) - D(0; X) = d, \quad (4)$$

где X – интервал времени, по прошествии которого рассматриваемый населенный пункт может быть отнесен к зоне с меньшим уровнем радиоактивного загрязнения.

При определении срока перехода рассматриваемого участка территории из зоны в зону в уравнении (4) следует принимать: 1) $d=50$ мЗв при переходе из зоны отчуждения в зону отселения; 2) $d=20$ мЗв при переходе из зоны отселения в зону ограниченного проживания; 3) $d=5$ мЗв при переходе из зоны ограниченного проживания в зону радиационного контроля; 4) $d=1$ мЗв при переходе из зоны радиационного контроля к территории вне зон радиоактивного загрязнения. При определении срока перехода X , задаваемого условием (4), наиболее удобно использовать метод итераций. Кроме того можно применять графический метод. Графический метод определения X является наглядным, но менее точным. При использовании графического метода на кривой набора дозы (откладываемой по оси ординат) с течением времени (откладываемым по оси абсцисс) отыскивается точка с абсциссой X , для которой выполняется условие (4).

Пример. На территории радиоактивного следа отобраны пробы почвы. По результатам γ -спектрометрических анализов этих проб почвы установлено, что через 10 часов после выброса доли вкладов в суммарную поверхностную активность почвы составляли: 0,5 для ^{131}I ; 0,2 для ^{134}Cs и 0,3 для ^{137}Cs . Определить мощности эффективной дозы для границ зон радиоактивного загрязнения на 4-е сутки (96 часов) после выброса.

Решение. Сначала требуется определить доли вкладов выпавших радионуклидов в суммарную поверхностную активность на 4-е сутки (96 часов) после выброса. На интервале от 10 часов до 96 часов после выброса требуется учесть только распад ^{131}I . За 86 часов доля ^{131}I в поверхностной активности снизится до величины $0,5 \cdot \exp(-0,693 \cdot 86 / 24 \cdot 8,04) = 0,5 \cdot \exp(-0,309) \approx 0,367$. Поэтому на 4-е сутки (96 часов) после выброса доли вкладов в суммарную поверхностную активность будут составлять: 0,42 для ^{131}I , 0,23 для ^{134}Cs и 0,35 для ^{137}Cs .

Расчет контрольной мощности эффективной дозы на 4-е сутки после выброса выполняется по формуле (3).

Коэффициенты G_i для перехода от плотности осадка радионуклида на почве к мощности эффективной дозы согласно данным таблицы составляют в (мЗв·м²)/(сутки·кБк): $22,5 \cdot 10^{-6}$ для ^{131}I , $86,4 \cdot 10^{-6}$ для ^{134}Cs и $32,8 \cdot 10^{-6}$ для ^{137}Cs . При расчете $P_{\kappa}(4)$ использованы периоды полураспада (8,04 суток для ^{131}I , 2,062 года для ^{134}Cs и 30 лет для ^{137}Cs), приведенные в Публикации 38 МКРЗ [3]. В результате выполненного расчета получена контрольная мощность эффективной дозы на 4-е сутки $P_{\kappa}(4) = 0,0039$ мЗв/сутки. Контрольная мощность эффективной дозы соответствует годовой эффективной дозе 1 мЗв. Поэтому на 4-е сутки после выброса мощность эффективной дозы на нижней границе зоны: 1) радиационного контроля – 0,0039 мЗв/сутки; 2) ограниченного проживания – 0,02 мЗв/сутки; 3) отселения – 0,078 мЗв/сутки; 4) отчуждения – 0,2 мЗв/сутки.

Предлагаемый метод позволяет определять границы принятых зон радиоактивного загрязнения на земной поверхности по величине мощности эффективной дозы, измеренной в тот или иной момент времени после образования радиоактивного следа. Это дает возможность заблаговременно (т.е. до того, как будут получены годовые дозы облучения) определять степень потребности или отсутствие таковой в проведении защиты людей от внешнего γ -облучения на участках радиоактивного следа.

Список использованной литературы

1. Jacob, P. Organ doses from radionuclides on the ground. Part I. Simple time dependencies [Текст] / P. Jacob, H.G. Paretzke, H. Rosenbaum, M. Zankle // Health Physics. – 1988. – V. 54, N 6. – P. 617-633.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) [Текст] : утв. 02.07.99. – Взамен НРБ-96. – М. : Минздрав России, 1999. – 116 с.
3. Схемы распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения [Текст]: публикация 38 МКРЗ; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

O.N. Prokof'ev

Zoning of the territories of radioactive trace

Federal Scientific Organization «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev» of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Saint-Petersburg

The method is intended for performance of zoning of a radioactive trace of emergency emission basing on the value of the level of an effective dose rate above a ground surface in this or that moment after emission. The actual composition of radionuclides, which deposited on the ground surface, is taken into consideration. The method allows to determine actual location of the borders of the zones of radiation control, limited residing, eviction and alienation according to the level of the effective dose above the ground surface in this or that moment after the emission. It enables to carry out the zoning of radioactive traces beginning with the moment of the radionuclides composition of fallout on a ground surface determination, without waiting of the accumulation of set full annual doses. As a result it is possible to start carrying out of countermeasures on the territory of a radioactive trace correspondingly to the levels of expected doses in a due time, i.e. before people will receive the doses.

Key words: Emergency emission, radioactive trace, effective dose, zoning.

Поступила 4.02.08.