

Влияние осаждения радионуклидов на подстилающую поверхность на оценки дозы облучения населения за счет выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух

Важными путями облучения человека при выбросах радиоактивных веществ являются: внешнее облучение от загрязненной подстилающей поверхности и внутреннее облучение от потребления загрязненных пищевых продуктов. В статье исследуется влияние факторов сухого осаждения и влажного выведения осадками радионуклидов на подстилающую поверхность при непрерывных выбросах на дозы облучения по указанным путям воздействия. Дана количественная оценка соотношения вкладов сухого и влажного выведения на облучение населения по этим путям в зависимости от основных действующих факторов и расстояния от источника. Показано, что при определенных условиях критические точки на местности, в которых суммарная доза и доза по каждому из основных путей воздействия достигает максимума, могут не совпадать. Предложены варианты учета выявленного факта при расчетах нормативов выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух.

Ключевые слова: радиоактивные вещества, радионуклид, непрерывный выброс, атмосферный воздух, сухое осаждение, влажное выведение осадками, подстилающая поверхность, выпадение, доза.

**А.В.Курындин, А.С.Шаповалов,
Е.А.Иванов, Р.М.Поляков**

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Москва

В результате выбросов радиоактивных веществ (далее – РВ) в атмосферный воздух формирование индивидуальной дозы облучения человека происходит по следующим основным путям воздействия [1-4]: внешнее облучение от погружения в радиоактивное облако – путь 1; внешнее облучение от радионуклидов, отложившихся на подстилающей поверхности – путь 2; внутреннее облучение от вдыхания воздуха, содержащего радионуклиды (ингаляционный путь) – путь 3; внутреннее облучение от потребления пищевых продуктов, содержащих радионуклиды (пероральный путь) – путь 4.

Современная парадигма нормирования выбросов РВ в атмосферный воздух основана на использовании гауссовых моделей рассеяния

примеси в атмосфере [2-5] для расчета среднегодового метеорологического фактора разбавления в приземном слое атмосферного воздуха.

При расчете годовой эффективной дозы облучения по основным путям облучения лиц из критической группы населения в режиме нормальной эксплуатации (далее – НЭ) объекта использования атомной энергии (далее – ОИАЭ) принимаются следующие консервативные предположения об условиях облучения [6]:

- возможно проживание человека в любой точке местности за пределами санитарно-защитной зоны (далее – СЗЗ) ОИАЭ;
- доза рассчитывается в точке наибольшей приземной объемной активности радионуклидов в атмосферном воздухе и наибольших радиоактивных выпадений на подстилающую поверхность земли за пределами СЗЗ (далее – критическая точка местности (этот тезис однозначно предполагает, что указанной критической точкой является критическая точка метеорологического фактора разбавления));
- весь набор сельскохозяйственной продукции (молоко, мясо, хлеб, картофель, овощи, фрукты) выращивается и производится в критической точке местности и потребляется местными жителями.

С учетом принятых допущений, в соответствии с [2-5] эффективная доза по путям воздействия 1 и 3 прямо пропорциональна временному интегралу объемной активности радионуклида в приземном слое атмосферы (такой подход к расчету дозы от облака имеет существенные ограничения [7-11]), тогда как эффективные дозы по второму и четвертому путям воздействия пропорциональны плотности выпадения радионуклида на подстилающую поверхность земли (количество радиоактивного вещества, накопившееся на единице площади подстилающей поверхности в течение определенного периода времени [12]). Выпадение радионуклида формируется за счет процессов сухого осаждения (представляет собой проинтегрированный по времени поток радионуклида на подстилающую поверхность с учетом радиоактивного распада [12]) и влажного выведения осадками (происходит за счет его вымывания атмосферными осадками и определяется не приземной объемной активностью радионуклида в атмосфере, а активностью радионуклида в столбе атмосферного воздуха, промываемого осадками [12]) радионуклида из облака выброса на подстилающую поверхность. Принципиально различные механизмы этих процессов способны существенно повлиять на оценки дозы облучения населения по второму и четвертому путям облучения и дозы по всем путям облучения, а также поставить под сомнение тезис, указанный в [6] о единой критической точке на местности за пределами СЗЗ, в которой доза по каждому пути воздействия достигает максимума.

Цель исследования

Целью исследования является количественная оценка соотношения вкладов сухого и влажного выведения радионуклидов из облака непрерывных выбросов ОИАЭ в облучение населения по второму и четвертому путям облучения в зависимости от основных действующих факторов и расстояния от источника, а также анализ условий, при которых критические точки дозы по второму и четвертому путям воздействия и метеорологического фактора разбавления за пределами СЗЗ не совпадают. Кроме того, будет дана оценка универсальности суждения о единой критической точке на местности за пределами СЗЗ, в которой суммарная доза и доза по каждому пути воздействия достигает максимума.

Метод исследования

Рассмотрим непрерывный выброс радионуклида из одиночного высокого организованного источника и оценим вклады сухого и влажного выведения радионуклидов из облака в дозы по второму и четвертому путям воздействия.

Внешнее облучение от радиоактивно загрязненной поверхности земли

В соответствии с [2-4] годовая доза внешнего облучения от выпадения радионуклида на подстилающую поверхность земли $E_{Sn}(x)$ в румбе n на расстоянии x от источника рассчитывается по формуле:

$$E_{Sn}(x) = E_{gn}(x) + E_{wn}(x), \quad x \geq R_{C33}, \quad (1)$$

$$E_{gn}(x) = Q \cdot D_{gn}(x) \cdot R_{S\lambda} \cdot (\lambda + \lambda_b)^{-1}, \quad D_{gn}(x) = u_g \cdot \overline{G}_n(x), \quad (2)$$

$$E_{wn}(x) = Q \cdot D_{wn}(x) \cdot R_{S\lambda} \cdot (\lambda + \lambda_b)^{-1}, \quad D_{wn}(x) = \Lambda \cdot G_n^z(x), \quad (3)$$

$$\overline{G}_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{x \cdot g} \cdot \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj} \cdot F_{jk}(x)}{\sigma_{z,j}(x) \cdot U_{jk}} \cdot \exp\left\{-\frac{H^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}\right\}, \quad \sum_n \sum_j \sum_k \omega_{nj} = 1, \quad (4)$$

$$G_n^z(x) = \frac{1}{g \cdot x} \cdot \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj}}{U_{jk}} \cdot F_{jk}(x), \quad g = \frac{2 \cdot \pi}{N}, \quad (5)$$

$$F_{jk}(x) = F_{jk}^d(x) \cdot F_{jk}^g(x) \cdot F_{jk}^A(x), \quad F_{jk}^d(x) = \exp\left(-\frac{\lambda \cdot x}{U_{jk}}\right), \quad (6)$$

$$F_{jk}^g(x) = \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{u_g}{U_{jk}} \cdot \int_0^x \frac{\exp\left\{-\frac{H^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right\}}{\sigma_{z,j}(x)} \cdot dx\right), \quad F_{jk}^w(x) = \exp\left(-\frac{\Lambda \cdot x}{U_{jk}}\right), \quad (7)$$

где:

- $E_{gn}(x)$ и $E_{wn}(x)$ – годовая доза внешнего облучения за счет сухого осаждения и влажного выведения радионуклида на подстилающую поверхность на расстоянии x от источника в направлении ветра румба n , соответственно, Зв;
- $D_{gn}(x)$ и $D_{wn}(x)$ – среднегодовой метеорологический фактор сухого осаждения и влажного выведения радионуклида на подстилающую поверхность на расстоянии x от источника в направлении ветра румба n , соответственно, Бк/м²;
- R_{C33} – радиус СЗЗ, м;
- Q – активность выброса, Бк/год;
- u_g – скорость сухого осаждения радионуклида на подстилающую поверхность, м/с (определяется как отношение потока загрязняющего вещества к его объемной активности в атмосфере вблизи подстилающей поверхности [2,12]);
- Λ – среднегодовая постоянная вымывания радионуклида осадками из подоблачного слоя атмосферы (определяется среднегодовой интенсивностью атмосферных осадков и их распределением по типам в зависимости от относительной вымывающей способности [2,12]), с⁻¹;
- $\overline{G}_n(x)$ – среднегодовой метеорологический фактор разбавления в приземном слое атмосферного воздуха на расстоянии x от источника в направлении ветра румба n , с/м³;
- $G_n^z(x)$ – интеграл по вертикальной координате z от зависящего от высоты над поверхностью земли среднегодового метеорологического фактора разбавления на расстоянии x от источника в направлении ветра румба n , с/м²;

- ϑ – угловая ширина румба;
- N – число румбов;
- H – высота источника (принимается, что высотой теплового и динамического подъема выброса из источника можно пренебречь), м;
- $\omega_{nj k}$ – повторяемость метеорологических условий, представляющая собой вероятность совместной реализации направления ветра в румбе n , при категории устойчивости j и градации скорости ветра k ;
- $F_{j k}^d(x)$, $F_{j k}^g(x)$, $F_{j k}^w(x)$ – фактор истощения струи, соответственно, за счет радиоактивного распада, сухого осаждения и влажного выведения радионуклида из атмосферы на подстилающую поверхность при скорости ветра на высоте флюгера из градации k для категории устойчивости атмосферы j ;
- $U_{j k}$ – скорость ветра на высоте флюгера из градации k для категории устойчивости атмосферы j , м/с;
- $\sigma_{z j}(x)$ – стандартное отклонение распределения концентрации в вертикальном направлении распространения облака на расстоянии x от точечного источника для категории устойчивости атмосферы j , м;
- λ – постоянная физического распада, c^{-1} ;
- λ_b – постоянная биологического выведения радионуклида из поверхностных слоев почвы, c^{-1} ;
- $R_S \lambda$ – коэффициент дозового преобразования при внешнем облучении человека от радиоактивно загрязненной поверхности без учета выведения радионуклида из поверхностных слоев почвы, $(Зв \cdot м^2)/(с \cdot Бк)$.

Из определения $G_n^z(x)$ может сложиться впечатление, что эта величина зависит от закона распределения радионуклида в вертикальном направлении. Можно показать, что это не так, получив выражение для величины $G_n^z(x)$ альтернативным путем.

В предположении экспоненциального закона (7) истощение струи за счет влажного выведения радионуклида из атмосферы на участке в пределах расстояний от x до $x + dx$ в румбе n равно:

$$\begin{aligned} dA_n(x) &= A_n(x) - A_n(x + dx) = Q \cdot \sum_j \sum_k \omega_{nj k} \cdot [F_{j k}(x) - F_{j k}(x + dx)] = \\ &= Q \cdot \sum_j \sum_k \omega_{nj k} \cdot F_{j k}^d(x) \cdot F_{j k}^g(x) \cdot \left\{ \exp\left\{-\lambda \cdot \frac{x}{U_{j k}}\right\} - \exp\left\{-\lambda \cdot \frac{x + dx}{U_{j k}}\right\} \right\} = , \quad (8) \\ &= Q \cdot \sum_j \sum_k \omega_{nj k} \cdot F_{j k}(x) \cdot \left\{ 1 - \exp\left\{-\lambda \cdot \frac{dx}{U_{j k}}\right\} \right\} = \lambda \cdot Q \cdot \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj k} \cdot F_{j k}(x)}{U_{j k}} \cdot dx \end{aligned}$$

где $A_n(x)$ – истощение струи за счет влажного выведения радионуклида из атмосферы на расстоянии x от источника в румбе n , Бк.

Выведенные за счет влажного вымывания из облака радионуклиды осаждаются на участок подстилающей поверхности, площадь которого равна:

$$dS(x) = \Delta y \cdot dx = \vartheta \cdot x \cdot dx, \quad \Delta y = 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \approx \vartheta \cdot x, \quad (9)$$

где Δy – линейная ширина румба на расстоянии x от источника, м.

Тогда из (8) с учетом (9) получим формулу для расчета среднегодового метеорологического фактора влажного выведения радионуклида на подстилающую поверхность на расстоянии x от источника в направлении ветра румба n :

$$D_{wn}(x) = \frac{1}{Q} \cdot \frac{dA_n(x)}{dS(x)} = \Lambda \cdot \frac{1}{g \cdot x} \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj} \cdot F_{jk}(x)}{U_{jk}} = \Lambda \cdot G_n^z(x). \quad (10)$$

Из сравнения выражений (5) и (10) видно, что формулы для расчета величины $G_n^z(x)$ совпадают, то есть величина $G_n^z(x)$ не зависит от вертикального распределения радионуклида в облаке при экспоненциальном законе влажного выведения радионуклида на подстилающую поверхность.

В [2] расчет вертикальной дисперсии струи примеси рекомендуется выполнять с использованием параметризации Смита-Хоскера или формулы Бриггса в зависимости от типа подстилающей поверхности. Зависимость функции $\sigma_z(x)$ от аргумента x может быть представлена в виде:

$$\sigma_{zj}(x) \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow 0, \sigma_{zj}(x) \uparrow \text{ при } x \uparrow, x \in [0, x_j^{max}], \sigma_{zj}(x) = \sigma_{zj}^{max} \text{ при } x \geq x_j^{max}, \quad (11)$$

где σ_{zj}^{max} – верхняя граница $\sigma_{zj}(x)$ для категории устойчивости j [1].

С учетом этого обстоятельства формально из формул (2) – (5) будем иметь:

$$E_{gn}(x) \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow 0 \text{ и } E_{wn}(x) \rightarrow \infty \text{ при } x \rightarrow 0. \quad (12)$$

Очевидно, что в реальных обстоятельствах население проживает на определенном расстоянии от источника $x \geq R_{СЗЗ}$, и рассмотренный случай является гипотетическим, но позволяет качественно оценить поведение функций $E_{gn}(x)$ и $E_{wn}(x)$ на предельно близких к источнику расстояниях.

Рассмотрим отношение между величинами $E_{gn}(x)$ и $E_{wn}(x)$:

$$\mu_n(x) = \frac{E_{gn}(x)}{E_{wn}(x)} = \frac{u_g}{\Lambda} \cdot \frac{\bar{G}_n(x)}{G_n^z(x)}. \quad (13)$$

Тогда формулу (1) с учетом (13) можно записать в виде:

$$E_{Sn}(x) = E_{gn}(x) \cdot [1 + \mu_n^{-1}(x)] = E_{wn}(x) \cdot [1 + \mu_n(x)]. \quad (14)$$

С учетом соотношений (4) и (5) выражение (13) приобретает вид:

$$\mu_n(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{u_g}{H \cdot \Lambda} \cdot \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj} \cdot F_{jk}(x)}{U_{jk}} \cdot \varphi(\xi_j) \cdot \left[\sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj} \cdot F_{jk}(x)}{U_{jk}} \right]^{-1}, \quad (15)$$

$$\varphi(\xi_j) = \xi_j \cdot \exp\{-\xi_j^2\}, \quad \xi_j = \frac{H}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{zj}(x)}. \quad (16)$$

Из (12) – (16) формально имеем:

$$\mu_n(x) \rightarrow 0 \text{ и } E_{Sn}(x) \rightarrow \infty \text{ при } x \rightarrow 0. \quad (17)$$

Из (17), в частности, следует, что при определенных условиях доминирующий вклад в $E_{Sn}(x)$ за пределами СЗЗ будет обусловлен влажным осаждением радионуклида из облака на подстилающую поверхность.

Для нахождения максимума функции $\mu_n(x)$ следует найти максимум функции $\varphi(\xi_j)$. Необходимое и достаточное условие существования максимума этой функции записываются в виде:

$$\frac{\partial \varphi(\xi_j)}{\partial \xi_j} = 0, \quad \frac{\partial \varphi^2(\xi_j)}{\partial \xi_j^2} < 0. \quad (18)$$

Проверка соблюдения этих условий с учетом (16) показывает:

$$\frac{\partial \varphi(\xi_j)}{\partial \xi_j} = \exp\{-\xi_j^2\} \cdot (1 - 2 \cdot \xi_j^2) = 0 \rightarrow \xi_{*j} = \frac{1}{\sqrt{2}} \rightarrow \sigma_{zj}(x_{*j}) = H, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \varphi^2(\xi_j)}{\partial \xi_j^2} = -2 \cdot \xi_{*j} \cdot \exp\{-\xi_{*j}^2\} \cdot (3 - 2 \cdot \xi_{*j}^2) = -2 \cdot \sqrt{\frac{2}{e}} < 0, \quad (20)$$

где ξ_{*j} – критическая точка функции $\varphi(\xi_j)$.

Тогда

$$\varphi_{max} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot e}}, \quad (21)$$

где e является основанием натурального логарифма, равным 2,718.

С учетом (15) и (21) верхняя оценка величины $\mu_n(x)$ равна:

$$\bar{\mu} = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{u_g}{H \cdot \Lambda} \rightarrow \bar{\mu} \uparrow \text{ при } H \downarrow \text{ и } \Lambda \downarrow. \quad (22)$$

В практических расчетах с целью обоснования нормативов выбросов РВ скорость сухого осаждения радионуклида на подстилающую поверхность u_g , постоянная вымывания радионуклида из атмосферы осадками (жидкие, смешанные и твердые) Λ и продолжительности осадков в течение года определяются согласно рекомендациям приложения № 3 к РБ-106-21 [2].

Вместе с тем, следует отметить, что в действительности оценки указанных величин характеризуются достаточно большими неопределенностями.

Скорость сухого осаждения

Равенство (2) не объясняет физического механизма осаждения, но является удобным и простым методом выражения суммарного действия сложного и малопонятного явления сухого осаждения. Обычно скорость сухого осаждения u_g определяют по измеренным концентрациям χ и потоку ω примеси на некоторой высоте над подстилающей поверхностью (величины χ и ω должны измеряться на высоте шероховатости z_0 , в противном случае u_g зависит от метеоусловий, однако χ может быть измерено только на уровне $z > z_0$) [13-16].

В [14] на основе серии опытов сделан вывод, что скорость сухого осаждения ^{131}I изменяется больше, чем на порядок величины и сильно зависит от характера растительности и подстилающей поверхности. В отсутствии достоверной информации о физических процессах, протекающих при сухом осаждении ^{131}I на естественные поверхности, по итогам этих исследований для травы и воды максимальную скорость сухого осаждения ^{131}I предложено принять равной 0,02 м/с (именно это значение принято в [2] для скорости сухого осаждения элементарного йода (I_2) независимо от типа подстилающей поверхности), для твердых поверхностей и снега – $5 \cdot 10^{-3}$ м/с. В [14] представлены также результаты исследования выбросов ряда радиоактивных изотопов (^{131}I , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{141}Ce , $^{127,129}\text{Te}$) из ядерного реактора, их распространения в атмосферном воздухе и сухого осаждения на различные подстилающие поверхности (вода, почва, трава, липкая бумага). Метеоусловия охватывали широкий спектр состояний устойчивости атмосферы, а измерения выпадений и приземной объемной активности изотопов производились до расстояний 3,2 км от источника. Представленные в [14] скорости сухого осаждения радиоизотопов имеют значительный (на порядок величины) разброс, который нельзя объяснить текущими метеорологическими условиями. Например, расчетные оценки скорости осаждения ^{137}Cs на траву изменялись от $4 \cdot 10^{-4}$ м/с до $4 \cdot 10^{-3}$ м/с, среднее значение (объем выборки равен 21)

составило $2 \cdot 10^{-3}$ м/с. В [2] для всех радиоизотопов в аэрозольной форме и типов подстилающей поверхности принято $u_g = 8 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Согласно [15,16], экспериментальные оценки величины u_g (рис. 8.7, 8.8 [15,16]), полученные практически в одних и тех же условиях для размеров аэрозолей от 0,1 мкм до 1 мкм, отличаются на порядок величины и для невесомой примеси находятся в диапазоне значений $u_g = (10^{-4} \div 10^{-2})$ м/с.

В принципе, величина u_g должна зависеть от состава аэрозольной частицы (адгезии к поверхности), скорости ветра в приземном слое (скорости трения u_*), термической устойчивости и атмосферной турбулентности [13-16].

Вымывание примеси из атмосферы осадками

В [2] представлен алгоритм расчета среднегодовой постоянной вымывания радионуклида осадками из подоблачного слоя атмосферы. В [14] отмечается, что вследствие трудностей теоретического расчета коэффициента захвата частиц каплями дождя во всем интервале спектров размера частиц и капель, трудностей, осложняющихся наличием электрических зарядов, величина которых неизвестна, постоянную вымывания радионуклида из атмосферы жидкими осадками предпочтительней определять экспериментальным путем. Это связано также и с тем, что падающие капли дождя сравнительно хорошо улавливают частицы размером больше 1 мкм, т. е. кривая зависимости коэффициента захвата от размера частиц в области (0,1 ÷ 1) мкм имеет провал. Соответственно, неопределенность оценок величины Λ может превышать порядок величины [13] и меньше 0,1 мкм. Указанная рекомендация справедлива и для общей корректной оценки величины Λ . Это можно сделать, например, измеряя убывание объемной активности изотопа в воздухе во время осадков вследствие ее вымывания по формуле (7).

Таким образом, для конкретного ОИАЭ и района его расположения реальное значение величины $\bar{\mu}$ может значительно отличаться от величины, определенной исходя из оценок параметров u_g и Λ , принятых в [2]. При определенных условиях (например, при сравнении прогнозируемой и наблюдаемой в районе расположения ОИАЭ плотности выпадений) это обстоятельство может привести к неадекватным оценкам дозы облучения по второму и четвертому путям воздействия.

Верхняя оценка фактора разбавления $\bar{G}_n(x)$

Способ 1

Преобразуем формулу (4) к виду:

$$\bar{G}_n(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot x \cdot H \cdot g} \cdot \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj} \cdot F_{jk}(x)}{U_{jk}} \cdot \varphi(\xi_j). \quad (23)$$

Тогда выражение для верхней оценки величины $\bar{G}_n(x)$ с учетом соотношений (19)–(21) приобретает вид:

$$\overline{\bar{G}_{1,n}(x)} = \frac{2}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot e \cdot x \cdot H \cdot g}} \cdot \overline{U_n^{-1}}, \quad \overline{U_n^{-1}} = \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj}}{U_{jk}}, \quad (24)$$

а критические точки этой функции $x_{c1,j}$ совпадают с соответствующими критическими точками функции $\mu_n(x)$ то есть $x_{c1,j} = x_{*j}$.

Следует отметить, что при получении формулы (24) зависимость $\overline{G}_n(x)$ от x учитывается исключительно через функцию $\varphi(\xi_j)$, и игнорируется факт прямой зависимости $\overline{G}_n(x)$ от x . Как будет показано ниже, этот факт мало влияет на верхнюю оценку функции $\overline{G}_n(x)$, но сильно влияет на расположение относительно источника точки на местности, в которой функция достигает максимума. Верхняя оценка фактора разбавления по формуле (24) хорошо известна как оценка по методу огибающей и широко используется на практике [7,8,17,18], когда есть необходимость в консервативной оценке величины $\overline{G}_n(x)$ в условиях ограниченной информации о климатической ситуации в районе расположения источника. Численные эксперименты показывают, что для широкого набора исходных данных значение величины $\overline{G}_{1,n}(x_c)$ примерно в 1,5 раза превышает максимальное значение величины $\overline{G}_n(x)$, полученное по формуле (4) с использованием достоверных данных ω_{nj} .

Способ 2

Преобразуем формулу (4) к виду:

$$\overline{G}_n(x) = \frac{4}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot H^2 \cdot g}} \cdot \frac{\sigma_{zj}(x)}{x} \sum_j \sum_k \frac{\omega_{nj} \cdot F_{jk}(x)}{U_{jk}} \cdot \psi(\zeta_j). \quad (25)$$

$$\psi(\zeta_j) = \zeta_j \cdot \exp\{-\zeta_j\}, \quad \zeta_j = \frac{H^2}{2 \cdot \sigma_{z,j}^2(x)}. \quad (26)$$

Если предположить, что $\sigma_{zj}(x)/x$ изменяется медленно с изменением x , то для нахождения максимума функции $\overline{G}_n(x)$ следует найти максимум функции $\psi(\zeta_j)$. Необходимое и достаточное условия существования максимума этой функции записываются в виде:

$$\frac{\partial \psi(\zeta_j)}{\partial \zeta_j} = 0, \quad \frac{\partial \psi^2(\zeta_j)}{\partial \zeta_j^2} < 0. \quad (27)$$

Проверка соблюдения этих условий с учетом (26) показывает:

$$\frac{\partial \psi(\zeta_j)}{\partial \zeta_j} = \exp\{-\zeta_j\} \cdot (1 - \zeta_j) = 0 \rightarrow \zeta_{*j} = 1 \rightarrow \sigma_{zj}(x_{c2,j}) = \frac{H}{\sqrt{2}}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial \psi^2(\zeta_j)}{\partial \zeta_j^2} = -\exp\{-\zeta_{*j}\} \cdot (2 - \zeta_{*j}) = -\exp\{-1\} < 0. \quad (29)$$

где ζ_{*j} – критическая точка функции $\psi(\zeta_j)$, а $x_{c2,j}$ – фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$.

Тогда

$$\psi_{max} = e^{-1}. \quad (30)$$

Из (25) с учетом (28) и (30) получим верхнюю оценку величины $\overline{G}_n(x)$:

$$\overline{G}_{2,n}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot e \cdot H \cdot x \cdot g}} \cdot \overline{U}_n^{-1}. \quad (31)$$

В отсутствии данных о величинах $\{\omega_{nj}\}$ выражения (24) и (31), в соответствии с [2], можно записать в виде:

$$\overline{U}_n^{-1} \rightarrow \overline{U}_n : \overline{G}_{1,n}(x) \approx \frac{2 \cdot \omega_n}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot e \cdot g \cdot H \cdot \overline{U}_n \cdot x}} \quad \text{и} \quad \overline{G}_{2,n}(x) \approx \frac{2 \cdot \omega_n}{\sqrt{\pi \cdot e \cdot g \cdot H \cdot \overline{U}_n \cdot x}}, \quad (32)$$

где:

ω_n – повторяемость направлений ветра в румбе n ;

\overline{U}_n – среднегодовая скорость ветра в румбе n .

Из формул (24) и (31), равно как и из формулы (32), следует:

$$\frac{\overline{G_{1,n}(x)}}{\overline{G_{2,n}(x)}} = \sqrt{0,5 \cdot e} \approx 1,166, \quad (33)$$

при этом взаимосвязь между критическими точками альтернативных верхних оценок фактора разбавления $\overline{G_n}(x)$ с учетом выражений (19) и (28), имеет вид:

$$\frac{\sigma_{zj}(x_{c1,j})}{\sigma_{zj}(x_{c2,j})} = \sqrt{2} \rightarrow x_{c1,j} > x_{c2,j} < x_{*j}. \quad (34)$$

Из анализа соотношений (33) и (34) следует, что при небольшом различии (около 17%) в альтернативных верхних оценках фактора разбавления $\overline{G_n}(x)$ критическая точка $x_{c2,j}$ находится значительно ближе к источнику, чем $x_{c1,j}$ и критическая точка ξ_{*j} функции $\mu_n(x)$. Достоверность полученного результата (в рамках принятой в [2-4] гауссовой модели рассеяния радионуклидов в атмосфере) может быть оценена путем проведения численных исследований в различных условиях с использованием широкого спектра реальных данных об источнике и районе расположения ОИАЭ. Результаты выполненных ранее расчетных исследований (использовались реальные данные по 10 ОИАЭ и климатические данные районов их размещения) подтвердили общий вывод проведенного выше теоретического исследования: критическая точка метеорологического фактора разбавления $\overline{G_n}(x)$ находится значительно ближе к источнику, чем критическая точка функции $\mu_n(x)$. Этот вывод имеет важное практическое значение при выявлении условий, при которых критическая точка функции $E_{Sn}(x)$ может не совпадать с критической точкой $\overline{G_n}(x)$.

Рассмотрим источник, расположенный в одном из регионов России, для которого: $H = 250$ м, $u_g = 8 \cdot 10^{-3}$ м/с, $\Lambda = 2,0 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹, $z_0 = 0,1$ м, $R_{C33} = 0,5$ км.

Тогда из (22) для принятых исходных данных получим:

$$\bar{\mu} = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{u_g}{H \cdot \Lambda} = 0,484 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 2,0 \cdot 10^{-6}} \approx 7,74. \quad (35)$$

С учетом фактической информации о величинах $\{\omega_{njc}\}$, максимальная расчетная оценка величины μ составляет $\mu_{max} \approx 5,85$ (то есть примерно в 1,32 раза меньше $\bar{\mu}$) и достигается при $x_* \approx 13$ км. В то же время, критическая точка фактора разбавления $\overline{G_n}(x)$ находится значительно ближе к источнику: $x_c = 4$ км, что подтверждает ранее сделанный вывод о взаимном расположении критических точек функций $\overline{G_n}(x)$ и $\mu_n(x)$ относительно источника.

Рассмотренный пример убедительно показывает, что $\mu_{max} \gg 1$ даже для достаточно высокого организованного источника и большого значения величины Λ .

При приближении к границе СЗЗ значения величины μ достаточно быстро снижаются: от $\mu_{max} \approx 5,85$ при $x = x_*$ до $\mu \approx 0,022$ при $x = R_{C33}$, то есть примерно в 265 раз (рис.1). За пределами СЗЗ функция $E_{Sn}(x)$ имеет два максимума: локальный и глобальный (рис.2). Локальный максимум функции $E_{Sn}(x)$ достигается в критической точке фактора разбавления $\overline{G_n}(x)$, а глобальный – вблизи границы СЗЗ. При этом отношение глобального и локального максимумов величины $E_{Sn}(x)$ составляет 2,1.

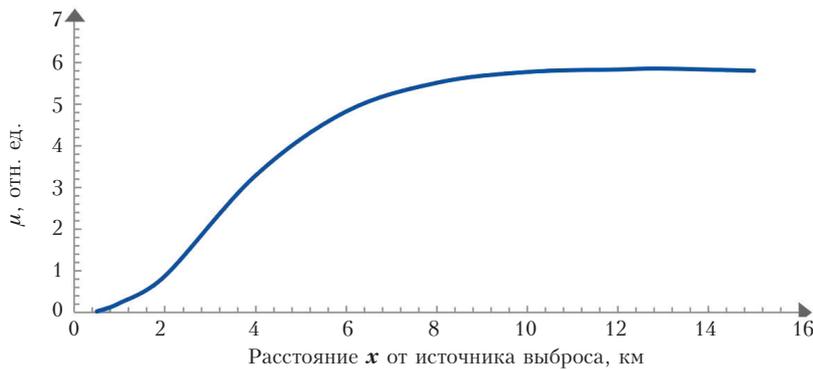


Рис.1. Пример зависимости μ от расстояния от источника при $H = 250$ м.

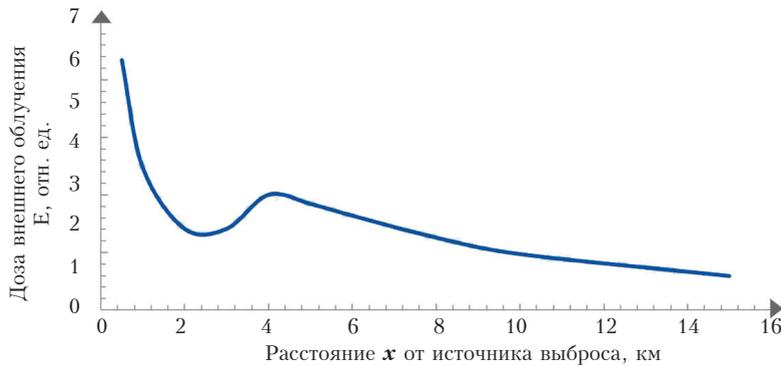


Рис.2. Пример зависимости дозы внешнего облучения от выпадений от расстояния от источника при $H = 250$ м.

Внутреннее облучение по пероральному пути воздействия

В соответствии с [2-4] годовая доза внутреннего облучения по четвертому пути воздействия в предположении гипотетического доминирования корневого пути над стеблевым прямо пропорциональна годовой дозе внешнего облучения за счет осаждения радионуклида на подстилающую поверхность (такая гипотеза полностью справедлива спустя год после аварийного выброса):

$$E_{ing,n}(x) \sim E_{Sn}(x), \tag{37}$$

где $E_{ing,n}(x)$ – годовая доза внутреннего облучения по пероральному пути на расстоянии x от источника в направлении ветра румба n , Зв/Бк.

В реальной ситуации доминирования стеблевого пути над корневым (это справедливо для подавляющего числа радионуклидов и следует из значений коэффициентов перехода «почва – пищевой продукт» [3,4]) при формировании внутреннего облучения по четвертому пути воздействия, в соответствии с [2], функция $E_{ing,n}(x)$ связана с $E_{Sn}(x)$ следующим соотношением:

$$E_{ing,n} \sim E_{Sn}(x) \cdot \left[1 - (1 - \beta) \cdot (1 + \mu_n(x))^{-1} \right], \tag{38}$$

β – коэффициент, учитывающий смывание «мокрых» осадений радионуклида с вегетативных частей растений, $\beta = 0,2$ [2,7,8]. В дальнейшем рассматривается этот вариант формирования дозы по четвертому пути. Проведенные расчеты показали, что функция $E_{ing,n}(x)$ при $R_{C33} = 0,5$ км имеет один максимум, который достигается в критической точке фактора разбавления $\bar{G}_n(x)$. Ситуация меняется, если принять $\tilde{R}_{C33} = 0,2$ км (рис.3).

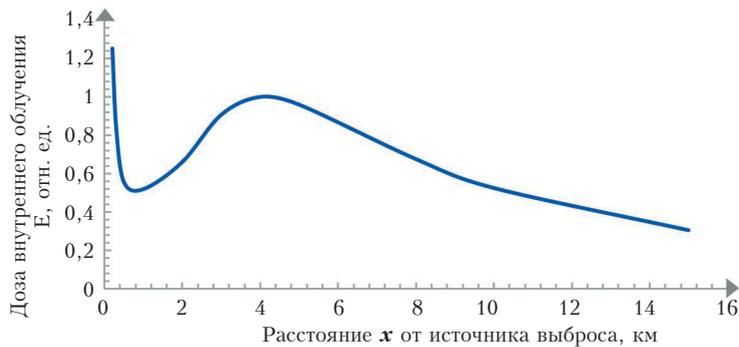


Рис.3. Пример зависимости дозы внутреннего облучения по пероральному пути от расстояния от источника при $H = 250$ м.

В этом случае за пределами СЗЗ функция $E_{ing,n}(x)$ имеет два максимума: локальный и глобальный. Локальный максимум функции $E_{ing,n}(x)$ достигается в критической точке фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$, а глобальный максимум – вблизи границы СЗЗ, то есть при $x \approx 0,20$ км. При этом отношение глобального и локального максимумов величины $E_{ing,n}(x)$ составляет 1,25.

Внешнее облучение от погружения в радиоактивное облако

Годовые эффективные дозы по второму, третьему и четвертому путям облучения достаточно корректно рассчитываются в рамках гауссовых моделей рассеяния примеси в атмосфере [2-5] на расстояниях до нескольких десятков километров от источника [9,10]. Применение гауссовых моделей к расчету годовой дозы внешнего облучения от погружения в радиоактивное облако $E_{cloud,n}(x)$ имеет существенное ограничение.

В [2-5] постулируется линейная связь между величинами $E_{cloud,n}(x)$ и $\overline{G}_n(x)$, что соответствует представлению облака в форме полубесконечного пространства с равномерным распределением радионуклидов. Такая идеализация допустима только для расчета величины $E_{cloud,n}(x)$ за зоной максимума приземной объемной активности радионуклида, то есть при $x > x_c$. При этом погрешность расчета величины $E_{cloud,n}(x)$ не будет превышать 10%, если толщина загрязненного слоя воздуха не меньше трех длин свободного пробега фотонов в воздухе [7-10].

Принятый в [2-5] подход для расчета величины $E_{cloud,n}(x)$ принципиально не применим для $x < x_c$. На таких расстояниях нижняя граница облака не достигает земли (нет погружения человека в облако), приземная объемная активность и доза от облака обычно принимаются равными нулю. Тогда как истинная доза облучения от гамма-излучающих радионуклидов, находящихся в облаке над человеком, может быть значительной [7-11].

Обсуждение результатов исследований

Показано, что среднегодовой метеорологический фактор влажного выведения радионуклида на подстилающую поверхность на любом расстоянии x от источника, в предположении экспоненциального закона удаления радионуклида из атмосферы осадками, не зависит от выбора модели рассеивания радионуклида в атмосфере.

На основе теоретических и численных исследований (в рамках гауссовой модели) установлено, что критическая точка функции $\mu_n(x)$ всегда находится на большем удалении от источника, чем критическая точка фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$.

Этот результат имеет важное практическое значение при выявлении условий, при которых критические точки функции $E_{Sn}(x)$, $E_{ing,n}(x)$ могут не совпадать с критической точкой фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$.

Расчетные исследования показывают, что для высокого источника, эффективная высота которого соизмерима с радиусом СЗЗ, и высоких значений величины Λ (сочетание большого суммарного среднегодового количества осадков с преобладанием твердых и смешанных осадков в районе размещения ОИАЭ), критические точки функций $E_{Sn}(x)$, $E_{ing,n}(x)$, $E_{max,n}(x)$ (максимальная годовая доза по всем путям облучения) и фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$ на местности могут не совпадать.

В тех случаях, когда величина $E_{max}(x)$ объективно достигается в точке $x < x_c$, использование [2-4] для расчета величины $E_{cloud}(x)$ в этой точке на местности может необоснованно значительно снизить оценку $E_{max}(x)$.

Представление [6], что во всех случаях критические точки фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$ и функции $E_{max,n}(x)$ совпадают, может приводить к необоснованно завышенным нормативам допустимых выбросов, при которых не гарантируется выполнение квоты (обязательность соблюдения этого критерия установлена в [1,2]).

Выводы

Выполнен анализ влияния осаждения радионуклидов на подстилающую поверхность за счет сухого осаждения и влажного выведения из облака выброса на:

- внешнее облучение от радионуклидов, отложившихся на подстилающей поверхности;
- внутренне облучение от потребления пищевых продуктов, содержащих радионуклиды (пероральный путь).

Полученный результат имеет принципиальное значение, так как опровергает преобладающее на практике мнение [6], что максимальная годовая доза облучения по всем путям воздействия (при обычно принимаемых консервативных положениях) всегда достигается в критической точке фактора разбавления, если она находится за пределами СЗЗ ОИАЭ.

Коренной причиной, при определенных условиях разрушающей сложившееся представление о единой критической точке для дозы по отдельным путям радиационного воздействия, является фактор влажного осаждения радионуклида на подстилающую поверхность за счет его вымывания атмосферными осадками.

В общем случае высокого источника, высота которого соизмерима с радиусом СЗЗ, и высоких значений величины Λ критические точки функций $E_{Sn}(x)$, $E_{ing,n}(x)$, $E_{max,n}(x)$ и фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$ могут не совпадать между собой на местности. В частности, критическая точка функции $E_{max,n}(x)$ может находиться значительно ближе к источнику (например, вблизи границы СЗЗ), чем критическая точка фактора разбавления $\overline{G}_n(x)$. В этом случае использование [2-4] для расчета величины $E_{cloud,n}(x)$ при $x < x_c$ может значительно снизить оценку $E_{max,n}(x)$.

Этот факт может быть учтен при плановом пересмотре методических документов [2-4] для расчета и обоснования нормативов выбросов РВ в атмосферу. Одним из возможных вариантов учета данного факта может быть решение при расчете максимальной годовой эффективной дозы облучения по основным путям облучения суммировать максимальные дозы облучения по отдельным путям воздействия независимо от возможного несовпадения их критических точек на местности за пределами СЗЗ. Альтернативный путь – привести в [2-4] алгоритм расчета

дозы внешнего облучения человека от радиоактивного облака на любом расстоянии от источника как это, например, предлагается в [7-11].

Литература

1. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ПДВ-2012): утв. приказом Ростехнадзора от 07.11.2012 № 639.
2. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. РБ-106-21. Утв. приказом Ростехнадзора от 30.08.2021 № 288.
3. Методические рекомендации по расчету нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ из организованных источников в атмосферный воздух применительно для организаций Госкорпорации «Росатом». Утв. распоряжением Госкорпорации «Росатом» от 15.07.2014 № 1-1/310-р.
4. МТ 1.2.1.15.1176-2016. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух (ПДВ АС-2016).
5. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Safety Reports Series no.19. Vienna: IAEA, 2001.
6. Крышев А.И., Бурякова А.А., Васянович М.Е., Екидин А.А. Оценка консервативности предположений об условиях облучения населения, принятых при установлении нормативов предельно допустимых выбросов // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1.
7. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Руководство по расчету индивидуальных и коллективных доз облучения населения от выбросов радионуклидов, поступающих в атмосферу, при эксплуатации АС. В сборнике «Правил и норм по радиационной безопасности в атомной энергетике», том III. Минздрав СССР, М., 1989.
9. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. Часть 1. МХО Интератомэнерго. М.: Энергоатомиздат, 1984.
10. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. МХО Интератомэнерго. М., 1992.
11. Michael W. McNaughton, Jessica M. Gillis, E. Ruedig, J.J. Whicker and David P. Fuehne, «Gamma-Ray Dose from an Overhead Plume», *Health Physics*, May 2017, vol. 112, no. 5.
12. Руководящий документ. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ при аварийных выбросах. РД 52.18.717-2009. Утв. заместителем Руководителя Роскомгидромета от 30.07.2009 (введен в действие 01.12.2009).
13. Бызова Н.Л. и Махонько К.П. О взаимодействии аэрозоля с подстилающей поверхностью // Изв. АН СССР, сер. «Физика атмосферы и океана», т. 4, № 9, М., 1968.
14. Метеорология и атомная энергия. Пер. с англ. под редакцией Бызовой Н.Л. и Махонько К.П. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971.
15. Пискунов В.Н. Динамика аэрозолей. Физматлит, М., 2010.
16. W. G.N. Slinn, «Parameterization for resuspension and for Wet and Dry Deposition of Particles and Gases for Use in Radiation Dose Calculations», *Nucl. Safety*, vol. 19(2), pp. 205-219, 1978.
17. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе площадок для атомных электростанций. Руководство по безопасности № 50-SG-S3. МАГАТЭ, Вена, 1982.
18. Теверовский Е.Н. и др. Допустимые выбросы радиоактивных и химических веществ в атмосферу. М.: Энергоатомиздат, 1985.

The Effect of Radionuclide Deposition on Estimates of the Population Exposure Due to the Release of Radioactive Substances into the Atmospheric Air

Kuryndin Anton, Shapovalov Al'bert, Ivanov Evgeny, Polyakov Roman (Federal Budgetary Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia)

Abstract

Some of the population exposure pathways from radioactive releases are: external exposure from contaminated underlying surfaces; internal exposure from consuming contaminated food.

The article examines the influence of dry and wet deposition factors during continuous release on population exposure along the indicated exposure pathways. A quantitative assessment of the ratio of contributions from dry and wet deposition to population exposure along these exposure pathways is given, depending on the main parameters and the distance from the source. It has been shown that under certain conditions, critical points on the terrain at which the total dose and the dose for each of the main exposure pathways reach a maximum may not coincide. Options for considering the identified fact in calculating limits for radioactive releases to air are proposed.

Keywords: *radioactive substances, radionuclide, continuous release, atmospheric air, dry deposition, wet deposition, underlying surface, deposition, dose.*

А.В.Курьиндин (к.т.н., зам.директора), А.С.Шаповалов (нач.отд.), Е.А.Иванов (к.т.н., с.н.с., г.н.с.), Р.М.Поляков (н.с.)

Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Москва

Контакты: ivanov@secnrs.ru, rpolyakov@secnrs.ru, shapovalov@secnrs.ru, kuryndin@secnrs.ru.