
**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 539.1.074:502.175

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
БЕСПИЛОТНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

© 2022 И.А. Родионов, А.П. Елохин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва, Россия

В работе рассматриваются методы оценки радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, основанные на двух сценариях. В первом анализ загрязнения осуществляется в рамках геофизической модели приземного слоя атмосферы, а перенос радиоактивной примеси, при котором и возникает загрязнение подстилающей поверхности, рассчитывается в рамках модели турбулентной диффузии. Второй сценарий состоит в анализе радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, имеющего случайный характер, обусловленный техногенными причинами, а его осуществление проводится с помощью беспилотного дозиметрического комплекса (БДК). Последнее позволяет существенно уменьшить прямое участие человека в радиационной разведке территории. Внимание в работе уделено программе полета беспилотных летательных аппаратов (высота, маршрут и т.д.), составу дозиметрического комплекса, математическому обеспечению БДК, математическим моделям оценки метеопараметров атмосферы, лежащих в основе модели приземного слоя и распространения радиоактивной примеси в атмосфере.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, радиоактивное загрязнение, окружающая среда, подстилающая поверхность, беспилотный летательный аппарат, беспилотный дозиметрический комплекс.

Поступила в редакцию 10.12.2021

После доработки 25.02. 2022

Принята к публикации 04.03.2022

Практика применения традиционных методов прогнозирования, при наличии фиксированных (проектных) источников радиационной опасности (выбросы из вентиляционных труб, брызгальных бассейнов и т.д.), в целом показала свою эффективность [1]. Однако, накопленный опыт аварий на различных объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) (НПО «МАЯК», Чернобыльская АЭС, АЭС Фукусима и т.д.) показал необходимость в развитии (модернизации) и/или дополнения имеющихся систем новым – дистанционным (бесконтактным) методом радиационного контроля окружающей среды [2].

Так, авария на АЭС Фукусима выявила определенный недостаток традиционных методов регистрации излучения с помощью автоматической системы контроля радиационной обстановки (АСКРО). В момент выброса радиоактивных веществ [3], у лиц, принимающих решение об эвакуации и оценке опасности, не было полного объема данных, как количественной информации, так и информации о географическом распределении радионуклидной примеси [4], [5] и [6], поскольку посты контроля в результате цунами были повреждены (23 из 24) [3].

В подобного рода ситуациях, когда возникает необходимость оценить степень радиационного загрязнения площадки или объекта, существует два способа действий: традиционный – метод отбора проб, с непосредственным участием человека, производящего радиационную оценку местности, и перспективный – бесконтактный, с использованием, например, беспилотного дозиметрического комплекса (БДК), применение которого позволило бы уменьшить риск облучения персонала,

осуществляющего поисковые и разведывательные работы, дозовыми нагрузками, превышающими предельно допустимые значения.

При использовании традиционного способа, возникают своего рода трудности – наличие мест или областей, нахождение на которых подвергает человека большой дозовой нагрузке, что ставит невозможность находиться на ней достаточное количество времени для проведения измерений. Данное обстоятельство, а также отсутствие подробной картограммы местности и расположения радиационных аномалий («горячих точек»), существенно затрудняет планирование процедур ликвидации последствий радиационной аварии [7].

Однако, в случае возникновения несанкционированного выброса в атмосферу на ОИАЭ, т.е. при известной геометрии расположения источника выбросов, на первое место выходит сценарий, в рамках которого оценка радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности и воздушного бассейна осуществляется путем использования геофизических моделей переноса воздушных масс, среди которых наиболее простой выглядит модель приземного слоя атмосферы Лайхмана Д.Л. [8]. Пространственное распределение радиоактивной примеси рассчитывается путем использования уравнения турбулентной диффузии с метеопараметрами, найденными при решении уравнений, описывающих указанные геофизические модели. Эти метеопараметры определяют основной характер зависимости переноса радиоактивной примеси в окружающей среде.

Основная часть

При проектировании Атомной станции в заданном регионе предварительно проводят ряд исследований характеристик этого региона с целью минимизации последствий в случае возникновения каких-либо чрезвычайных ситуаций. К таким исследованиям относятся и метеорологические исследования. Эти исследования в течение нескольких лет проводят в выбранном регионе, расставляя по его периметру метеомачты с метеодатчиками, наблюдая и регистрируя скорость ветра и характер его изменения, осадки, давление, температуру воздушной среды и подстилающей поверхности и т.д. [9-11]. Результаты этих исследований сводят в таблицу 1, для анализа которой и используют ту или иную геофизическую модель переноса воздушных масс, позволяющую выбрать наиболее характерные метеоусловия присущие данному региону.

Таблица 1 – Усредненные метеорологические данные района АЭС в Иордании [9] [Averaged metrological data of NPP area in Jordan]

Сезон	Время	Температура на высоте 1,5 м (°C)	Температура на высоте 10 м (°C)	Направление ветра на высоте 10 м (град)	Скорость ветра на высоте 10 м (м/с)	Температура на высоте 58 м (°C)	Направление ветра на высоте 58 м (град)	Скорость ветра на высоте 58 м (м/с)	Среднее значение давления (кПа)	* Температура на высоте 0 м (°C)
Лето	20:00	24,73	24,83	242,77	3,73	24,75	267,67	6,25	939	24,71
Осень	20:00	16,88	17,64	221,46	2,32	18,58	234,72	3,99	944	16,73
Зима	20:00	9,95	11,23	221,15	2,28	12,21	219,48	3,09	946	9,69
Весна	20:00	19,52	19,48	274,51	3,03	19,39	276,31	4,79	942	19,53

*Параметр рассчитан методом квадратичной экстраполяции: $y = ax^2 + bx + c$.

Выбирая из таблицы 1 наиболее характерные для данного региона параметры (скорость ветра, температуру) и время их наблюдения, можно существенно упростить ее анализ и, используя модель приземного слоя атмосферы, получить параметры, определяющие состояние воздушной среды, которое называют состоянием устойчивости атмосферы. Такими параметрами в рамках модели приземного слоя атмосферы являются масштаб приземного слоя L (масштаб Монина-Обухова) и динамическая скорость воздушного потока v_* .

Математическая модель оценки метеопараметров, определяющих состояние устойчивости атмосферы в рамках модели приземного слоя

В основе модели приземного слоя атмосферы лежат измерения скорости ветра $u(z)$, потенциальной температуры $\theta(z)$ $\theta(z) = T(z) \left(1000/P(z) \right)^{0,29}$, где $T(z)$ – измеряемая температура °K, $P(z)$ – атмосферное давление мбар) и, строго говоря, влажности воздушного потока, измеряемые на двух уровнях, различающихся по высоте z (см. табл.). Кроме того, дополнительно еще необходимо измерять температуру уровня земли T_0 , принимая, что скорость ветра на уровне земли всегда равна нулю. Разность скоростей ветра $Du = u(z_2) - u(z_1)$ и температур $D\theta = \theta(z_2) - \theta(z_1)$ при априори заданном параметре L , в рамках модели приземного слоя атмосферы, применяют для определения динамической скорости v_* , используя следующие соотношения [8-11]:

$v'_* = \chi \cdot Du / Du_n$; $v''_* = \chi \sqrt{(gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)}$, где $\chi = 0,4$ – постоянная Кармана; g – ускорение свободного падения; $u_n, \theta_n, Du_n, D\theta_n$ – безразмерные скорость ветра, температура и их разность соответственно, зависящие от безразмерной высоты $z_n = z/L$, т.е. от параметра приземного слоя L . Поскольку v'_* и v''_* представляют собой одну и ту же величину, то, очевидно, что при некотором L^* их разность или относительная погрешность ε будет близка к нулю, если известны выражения для $u_n(z_n), \theta_n(z_n)$:

$$\lim_{L \rightarrow L^*} \left\{ \left(\frac{Du}{Du_n} \right)^2 - \left| \frac{g}{T_0} L \frac{D\theta}{D\theta_n} \right| \right\} = 0; \quad \lim_{L \rightarrow L^*} \varepsilon = \left\{ \frac{(Du/Du_n)^2 - |(gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)|}{(Du/Du_n)^2} \right\} 100\% = 0. \quad (1)$$

Когда эти условия выполняются (при решении этой задачи в ряде случаев находят просто минимум ε), то это означает, что искомые параметры: масштаб приземного слоя L^* и динамическая скорость v_* найдены. Это позволяет найти выражения для безразмерных величин продольной скорости воздушного потока $u_n(z_n)$, температуры $\theta_n(z_n)$ и других его характеристик, которые находят в рамках модели приземного слоя атмосферы, определяя промежуточный параметр y как функцию z_n из уравнения Феррари¹ [8]:

$$z_n = 2/y - 2y^3/3 - 4/3, \quad (2)$$

аналитическое решение, которого имеет вид (3) [9, 10]:

$$y = \begin{cases} \frac{-\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B) - 4 \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2} \right)^2 + 3} \right]}}{2}; & z_n \geq -4/3; \\ \frac{\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B) - 4 \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2} \right)^2 + 3} \right]}}{2}; & z_n \leq -4/3, \end{cases} \quad (3)$$

¹ Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1974, (с.43). 832 с.

$$\text{где: } A = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} + \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}; B = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} - \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}.$$

Величины $u_n(z_n)$, $\theta_n(z_n)$ и другие безразмерные характеристики в модели приземного слоя атмосферы определяются следующей системой уравнений (4)-(7) [8]:

$$u_n = 2/y + 2 \operatorname{arctg}(y) + \ln \frac{|1-y|}{1+y} + c_1; \quad (4)$$

$$k_n = 1 - y^4; \quad (5)$$

$$b_n = y^2; \quad (6)$$

$$\theta_n = \int_{z_{0n}}^{z_n} \frac{dz_n}{\alpha_T k_n}, \quad (7)$$

где c_1 – постоянная, определяемая при граничном условии на уровне шероховатости z_0 , т.е. $u(z)|_{z=z_0} = 0$; $k_n(z_n)$ – безразмерный коэффициент турбулентной диффузии; $b_n(z_n)$ – энергия турбулентных пульсаций, играющая значительную роль при поперечном рассеянии радиоактивной примеси в атмосфере; $\alpha_T(z_n) = k_T/k$ – отношение коэффициентов турбулентности для тепла и количества движения [8]. При найденных указанных выше u_n , θ_n , b_n , k_n их размерные значения определяются выражениями (8):

$$u(z) = u_n v_* / \chi; \quad k(z) = k_n \chi L v_*; \quad b(z) = v_*^2 c^{-1/2} b_n = 4,6625 v_*^2 b_n \quad (8)$$

Решение задачи (1)-(8) проводилось в работах [9-11] для соответствующих метеорологических условий регионов стран, в которых предполагалось строительство АЭС.

Решение указанной задачи начинается с выбора параметра приземного слоя атмосферы L , для нахождения которого задаются некоторым значением $L_{\max} \sim 100$ м и варь-ируют его, например, $L_i = DL \cdot i$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$; $DL = L_{\max}/N$, $N \sim 100$ до тех пор, пока разность или относительная погрешность, приведенная в формуле (1), не будет минимальной. Найденное значение L^* , при котором ϵ минимальна, и определит искомый параметр L : $L^* = DL \cdot i^*$. Далее пересчитав z_n при заданных z_1 и z_2 , т.е., таким образом, пересчитав $D\theta_n$; Du_n , находят динамическую скорость $v'_* = \chi Du / Du_n$. В рамках модели приземного слоя атмосферы величина L может иметь разные знаки ($L > 0$, $L < 0$), что отвечает ее устойчивому или неустойчивому состояниям соответственно, поэтому в общем случае текущее значение параметра L_i определяют следующим образом: $L_i = DL(2N+1-i)$. При таком определении $L_i > 0$ для $i < 2N+1$ и $L_i < 0$ для $i > 2N+1$. Область $i = 2N+1$ отличается на графиках от искомой области и в расчет не принимается (см. рис.1).

Приведенные результаты расчета наглядно демонстрируют, характер зависимости метеорологических параметров $u(z)$; $k(z)$; $b(z)$, полученных в рамках модели приземного слоя атмосферы и определяющих перенос примеси в воздушной среде, от состояния устойчивости атмосферы. Результаты решения для устойчивого ($L_i = 39$ м, $v_* = 0,376$ м/с) и неустойчивого ($L_i = -5$ м, $v_* = 0,763$ м/с) состояний атмосферы приводятся на рисунках 1–8.

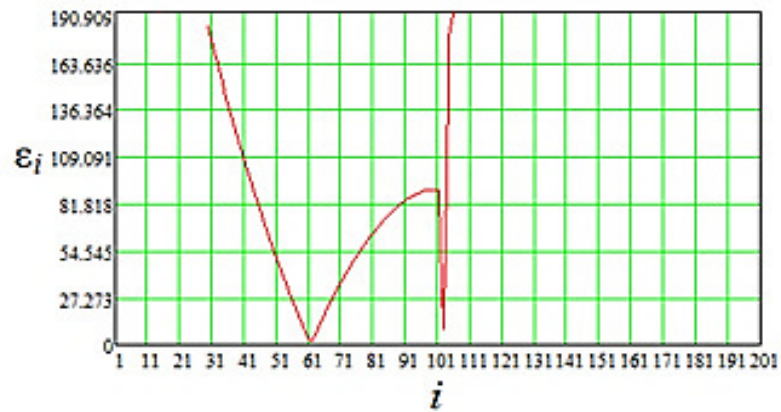


Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности $\varepsilon_i(i)$ при устойчивом состоянии атмосферы. Осень, 20.00 [Relative error dependence $\varepsilon_i(i)$ under steady state atmospheric conditions. Autumn, 20.00]

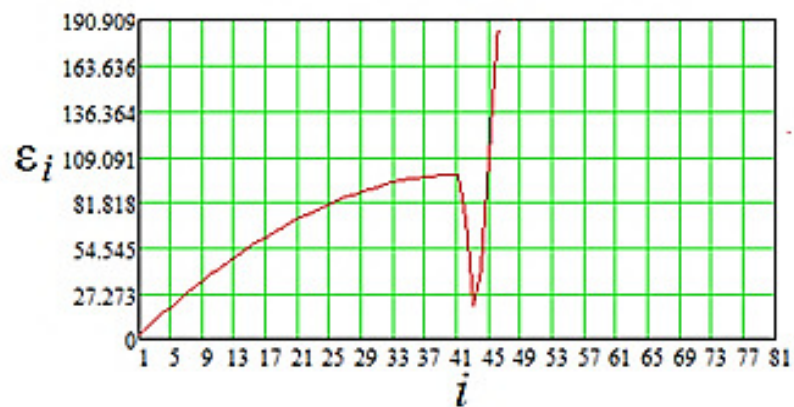


Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности $\varepsilon_i(i)$ при неустойчивом состоянии атмосферы. Весна, 20.00 [Relative error dependence $\varepsilon_i(i)$ under unstable atmospheric conditions. Spring, 20.00]

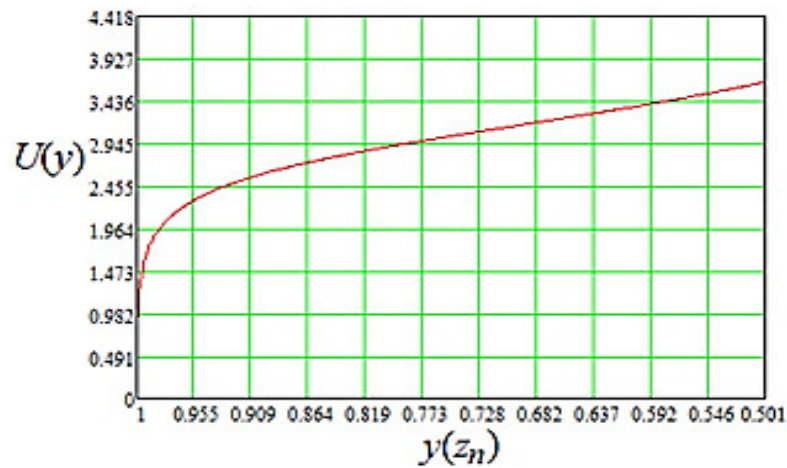


Рисунок 3 – Зависимость скорости ветра $U(y)$ как функции высоты при устойчивом состоянии атмосферы. Осень, 20.00 [Dependence of wind speed $U(y)$ as a function of altitude at steady state atmospheric conditions. Autumn, 20.00]

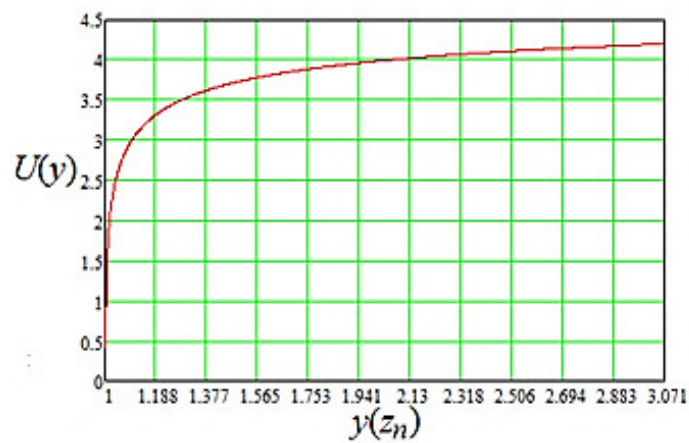


Рисунок 4 – Зависимость скорости ветра $U(y)$ как функции высоты при неустойчивом состоянии атмосферы. Весна, 20.00 [Dependence of wind speed $U(y)$ as a function of altitude under unstable atmospheric conditions. Spring, 20.00]

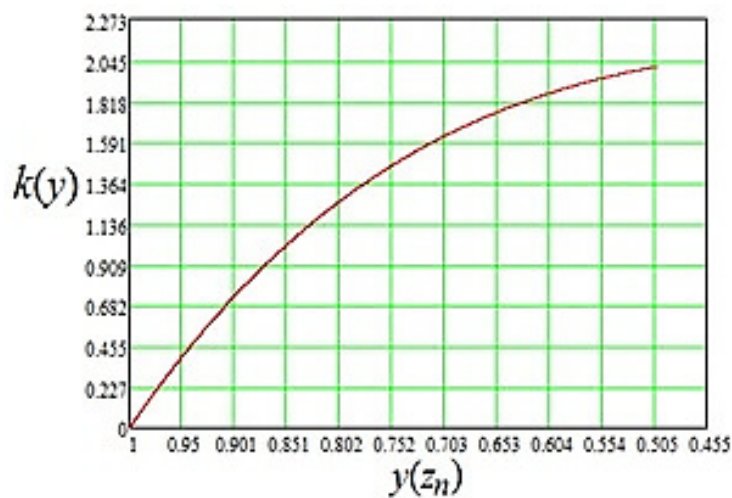


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии $k(y)$ как функции высоты при устойчивом состоянии атмосферы. Осень, 20.00 [Dependence of the turbulent diffusion coefficient $k(y)$ as a function of altitude at steady state atmospheric conditions. Autumn, 20.00]

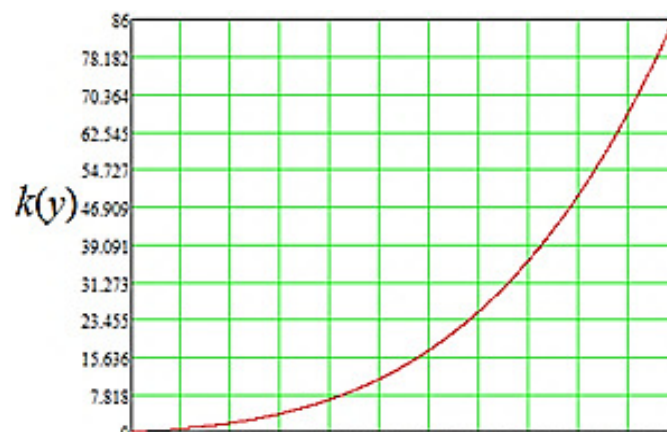


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии $k(y)$ как функции высоты при неустойчивом состоянии атмосферы. Весна, 20.00 $Li = -5$ м, $v_* = 0,763$ м/с [Dependence of the turbulent diffusion coefficient $k(y)$ as a function of altitude under unstable atmospheric conditions. Spring, 20.00 $Li = 5$ м, $v_* = 0,763$ м/с]

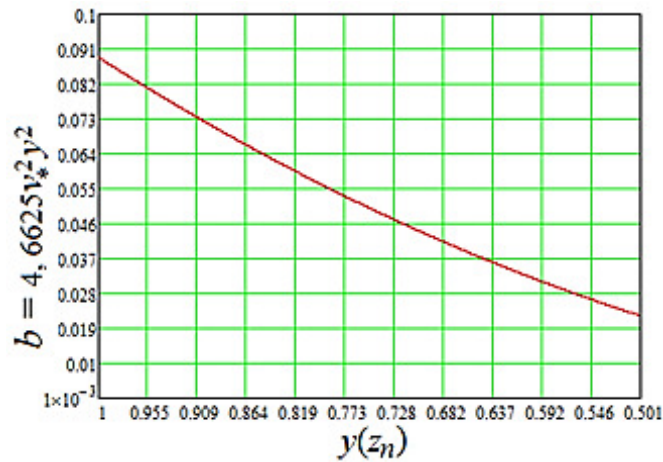


Рисунок 7 – Зависимость энергии турбулентных пульсаций $b(y)$ как функции высоты при устойчивом состоянии атмосферы. Осень, 20.00 [Dependence of turbulent pulsation energy $b(y)$ as a function of altitude at steady state atmosphere. Autumn, 20.00]

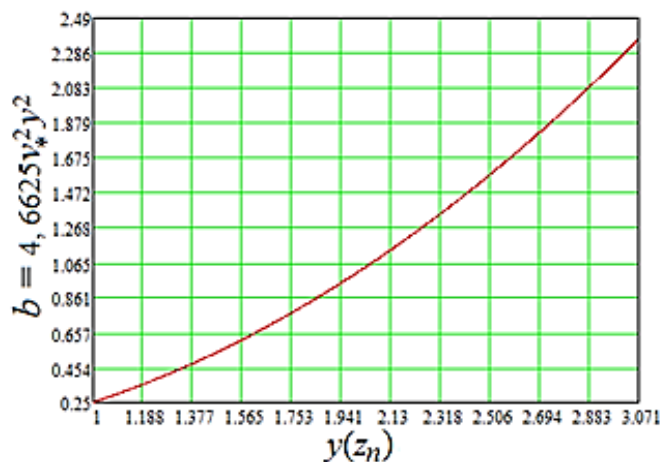


Рисунок 8 – Зависимость энергии турбулентных пульсаций $b(y)$ как функции высоты при неустойчивом состоянии атмосферы. Весна, 20.00 [Dependence of turbulent pulsation energy $b(y)$ as a function of altitude under unstable atmospheric conditions. Spring, 20.00]

Математическая модель переноса радиоактивной примеси в атмосфере.

В рамках стационарной модели турбулентной диффузии (при поперечной скорости воздушного потока равной нулю) объемная активность определяется решением уравнения, в котором поперечное рассеяние примеси осуществляется по закону Гаусса [8] (9):

$$q(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp(-y^2/2\sigma_y^2), \quad (9)$$

где $\sigma_y(x)$ — среднеквадратичное отклонение; функция $S(x, z)$ определяется выражением (10):

$$S(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(x, y, z) dy = 2 \int_0^{+\infty} q(x, y, z) dy \quad (10)$$

Таким образом, для объемной концентрации газоаэрозольной примеси получают уравнение (11):

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (11)$$

где $\varphi(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) dy = M \delta(x) \delta(z - h_{\text{эф}})$; $f = M \delta(x) \delta(y) \delta(z - h_{\text{эф}})$ – источник газоаэрозольной примеси, загрязняющий окружающую среду; M – мощность выброса (Бк/с) радиоактивной примеси из источника; $h_{\text{эф}}$ – эффективная высота выброса, представляющая собой сумму геометрической высоты источника H_0 и приращения Δh , обусловленного подъемом струи радиоактивной примеси в атмосфере за счет начальной ее скорости и температуры, если последняя выше температуры окружающей среды ($h_{\text{эф}} = H_0 + \Delta h$); σ – постоянная релаксации радиоактивной газоаэрозольной примеси, представляющая собой постоянную вымывания примеси из атмосферы σ_0 (с⁻¹), так что $\sigma = \sigma_0$; w – гравитационная скорость осаждения примеси. В рамках рассматриваемой модели переноса величину $\sigma_y^2(x)$ представляют в виде: $\sigma_y^2(x) = \bar{b}x^2 / \bar{u}^2 (1 + \alpha x \bar{b} / \bar{k} \bar{u})^*$, где $\bar{u}, \bar{k}, \bar{b}$ – значения указанных выше параметров, усредненных по приземному слою высотой $H_{\text{пр}} \approx 100$ м, $\alpha = 0,015$.

$$\bar{u} = \frac{1}{H_{\text{пр}}} \int_0^{H_{\text{пр}}} u(z) dz; \bar{k} = \frac{1}{H_{\text{пр}}} \int_0^{H_{\text{пр}}} k(z) dz; \bar{b} = \frac{1}{H_{\text{пр}}} \int_0^{H_{\text{пр}}} b(z) dz.$$

Граничные условия определяются выражениями (12)-(15):

$$S(x, z)|_{x=0} = 0; \quad (12)$$

$$S(x, z)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (13)$$

$$S(x, z)|_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad (14)$$

$$k \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w) S|_{z=z_0}, \quad (15)$$

где: β – скорость сухого осаждения газоаэрозольной примеси на подстилающую поверхность; z_0 – уровень шероховатости подстилающей поверхности.

Таким образом, при найденных в рамках модели приземного слоя атмосферы функциональных зависимостях параметров переноса воздушного потока, в математической модели турбулентной диффузии в атмосфере можно рассмотреть и перенос радиоактивной примеси, полагая в первом приближении, что она имеет один и тот же дисперсных характер. Аналитическое решение задачи (11) – (15) с постоянными коэффициентами описывается выражением (16), а объемная активность газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, непосредственно вычисляется по формуле (9).

* В рамках других моделей, описывающих перенос примеси в атмосфере эта зависимость может иметь другой вид (см, например, «Приказ Ростехнадзора» от 11.11.2015 № 458 «Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух»)

$$S(x, z) = \frac{M}{2} \exp \left(- \left[\frac{\sigma_0 x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4k\bar{u}} + \frac{w(z - h_{эф})}{2\bar{k}} \right] \right) \left\{ \frac{\exp(-[z + h_{эф}]^2 \bar{u} / 4kx) + \exp(-[z - h_{эф}]^2 \bar{u} / 4kx)}{\sqrt{\pi k \bar{u} x}} - \frac{(2\beta - w)}{k\bar{u}} \exp \left[- \frac{(2\beta - w)(z + h_{эф})}{2\bar{k}} + \left(\frac{2\beta - w}{2\bar{k}} \right)^2 \frac{kx}{\bar{u}} \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{2\beta - w}{2\bar{k}} \right) \sqrt{kx/\bar{u}} + \frac{(z + h_{эф})}{2\sqrt{kx/\bar{u}}} \right] \right\}, \quad (16)$$

Наибольший интерес полученное решение представляет при анализе осевого и поперечного распределений объемной активности радиоактивной примеси в атмосфере на небольшой высоте от подстилающей поверхности $\sim 0,5\text{--}1,5$ м. на различных расстояниях от источника выбросов. Выбирая такую высоту, можно быть уверенным, что найденная расчетная концентрация радиоактивной примеси через некоторое время точно окажется на подстилающей поверхности, создавая, таким образом, поверхностную активность.

Характер осевого и поперечного распределений, при распространении радиоактивной примеси в зависимости от типа состояния устойчивости атмосферы, представлен на рисунках 9, 10 [11].

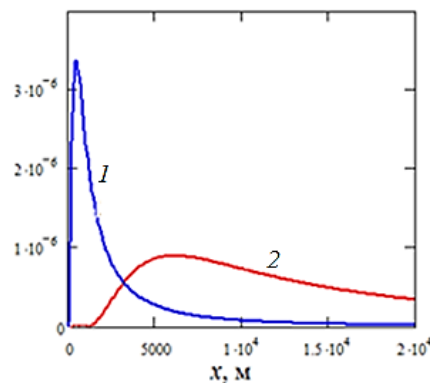


Рисунок 9 – Осевое распределение объемной активности при неустойчивом (1) и устойчивом (2) состояниях атмосферы [Axial distribution of volumetric activity in unstable (1) and stable (2) atmospheric states]

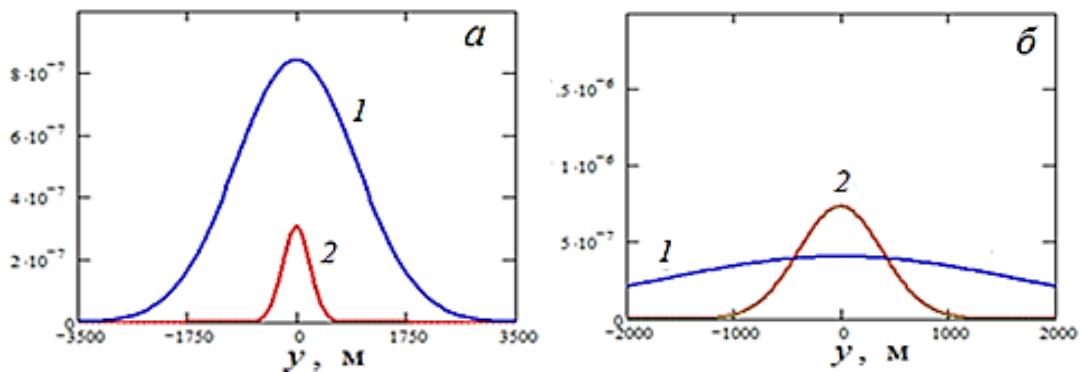


Рисунок 10 – Поперечное распределение объемной активности при неустойчивом (1) и устойчивом (2) состояниях атмосферы на расстоянии 2500 м метров (а) и 4000 метров (б) при $z = 1,5$ м [Cross-sectional distribution of volumetric activity in unstable (1) and stable (2) atmospheric conditions at 2500 m (a) and 4000 m (b) at $z = 1.5$ m]

Из осевого распределения примеси следует, что в зависимости от состояния устойчивости атмосферы максимум кривых распределения смещается вдоль оси (см. рис. 9). При одинаковом выбросе, максимум объемной активности при неустойчивом

состоянии оказывается ближе к источнику, а ее значение в максимуме больше, чем при устойчивом (см. рис. 10), что обусловлено сносом примеси в направлении ветра при состоянии устойчивости атмосферы. С ростом расстояния x от источника картина существенно изменяется: при неустойчивом состоянии объемная активность резко падает, за счет поперечного (гауссового) рассеяния (см. рис. 10 а, б), поэтому ее амплитудное значение на больших расстояниях от источника будет значительно меньше, чем при устойчивом.

Особенности переноса примеси при том и другом состояниях атмосферы, формируют и радиоактивное загрязнение подстилающей поверхности, характер распределения изолиний которых приведен на рисунках 11 и 12 [11].

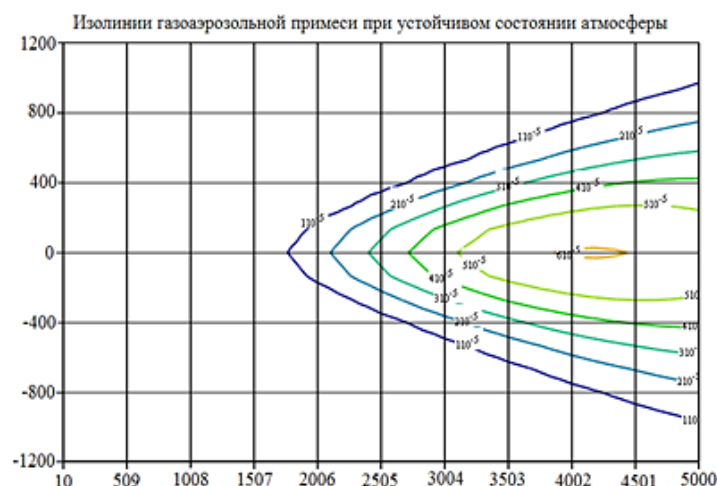


Рисунок 11 – Изолинии поверхностного загрязнения подстилающей поверхности для устойчивого состояния атмосферы [Isolines of underlying surface pollution for the steady atmosphere state]

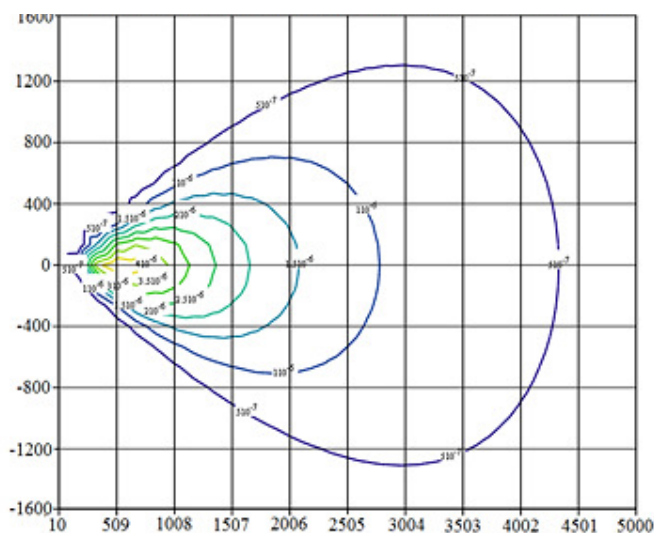


Рисунок 12 – Уровни поверхностного загрязнения подстилающей поверхности для неустойчивого состояния атмосферы [Underlying surface pollution levels for unstable atmospheric conditions]

Из приведенных распределений видно, что в зависимости от типа состояния устойчивости, атмосферы характер радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности существенно изменяется, что и накладывает определенные требования к первому сценарию, в рамках которого рассматривается последовательность действий, направленных на проведение анализа радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, при несанкционированном выбросе радиоактивной примеси в атмосферу:

1. Определение метеорологических параметров атмосферы;
2. Проведение расчетов в рамках существующих в организации моделей переноса примеси в атмосфере и их программного обеспечения.

При этом следует иметь ввиду то, что расчетные методы хорошо себя зарекомендовали при анализе радиоактивного загрязнения на расстояниях от источника, которые характеризуются постоянным или слабо изменяющимся уровнем шероховатости, поскольку изменение последнего приводит к существенному возмущению скорости воздушного потока в нижних слоях атмосферы [12]. Но поскольку ситуация со слабо изменяющимся уровнем шероховатости на больших расстояниях маловероятна, то расчетные данные на больших расстояниях дают большую погрешность, уменьшить которую можно, вводя лишь поправочный коэффициент k_p , полученный путем отношения $k_p = D'_{изм}/D'_{рас}$ (измеренной мощности дозы $D'_{изм}$ к расчетной ее величине $D'_{рас}$) и, таким образом, скорректировать результаты расчета, умножая их на этот коэффициент. Для этих целей целесообразно использовать БДК, поскольку такого типа аппарат может провести оценку мощности дозы, как от загрязненной подстилающей поверхности, так и в области воздушного бассейна в любой точке, координаты которой ему заданы.

Система измерений радиационной обстановки с помощью БДК

Основной состав БДК – это носитель (квадрокоптер, вертолет и т.д.) (рис. 13) беспилотный летательный аппарат (БПЛА), содержащий дозиметрическую аппаратуру (детектор мощности дозы γ -излучения, γ -спектрометр). Дополнительно также на БПЛА может устанавливаться аппаратура для вспомогательных функций: определение координат местоположения – датчики (GPS и/или ГЛОНАСС), детектор высоты или воздушного давления для определения высоты полета, видеокамера, и др. При эксплуатации БПЛА на первое место встает его конструктивная особенность – ограниченность времени полета, обусловленная запасом топлива или работоспособностью электрической батареи (для квадрокоптеров), которое значительно отличается для различных БПЛА, как и их стоимость, и составляет от 25 минут до 5 часов, например, (INDELA-SKY)². С увеличением полезной нагрузки время полета сокращается из-за возможной нехватки топлива. Таким образом, при данных ограничениях возникает задача выбора оптимальной траектории полета, решение которой позволит провести подробный анализ обширной территории, затратив на это наименьшее количество времени и топлива [13].



Рисунок 13 – БПЛА «INDELA-SKY», КБ ИНДЕЛА (Белоруссия) (1), Система «INDELA OGD-20HIR» (2), состоящая из четырех встроенных модулей (тепловизор, цветная камера, лазерный дальномер, инерциальный модуль). является базовой полезной нагрузкой для БПЛА «INDELA-I.N. SKY» при решении традиционных задач разведки, наблюдения и мониторинга. ["INDELA-SKY" UAV, INDELA KB (Belarus) (1), Sistema "INDELA OGD-20HIR" (2), consisting of four integrated modules (thermal imager, colour camera, laser rangefinder, inertial module). is the basic payload for the UAV "INDELA-I.N. SKY" for traditional reconnaissance, surveillance and monitoring tasks]

² Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) INDELA-I.N. SKY. КБ «ИНДЕЛА» Белоруссия. ТТД: Двигатель роторно-поршневого типа. Основные характеристики: длина 3052 мм, высота 1346 мм, база шасси 1180 мм, Диаметр НВ (винта) 3168 мм. Максимальный взлетный вес 140 кг, запас топлива 25 кг, часовой расход топлива 5 – 8 кг/ч. Вес полезной нагрузки 25 кг. Крейсерская скорость полета у земли 70 км/ч. Статический потолок без учета влияния близости земли 1500 м. Продолжительность полета (высота 100 – 500 м) 4 – 5 ч.

На данный момент выполнено множество экспериментов с БДК различного вида.

Основное внимание исследователей уделялось его аппаратуре, используемой при решении различных задач. Например, для оценки степени загрязненности территории радиоактивной примесью может оказаться достаточным применение чувствительного радиометра или датчика мощности дозы. Если речь идет о составе радионуклидов, загрязняющих подстилающую поверхность, тогда на БПЛА необходимо установить аппаратуру, измеряющую спектр γ -излучения, по энергии которого и определяют искомые характеристики. Задача усложняется в зависимости от поставленной цели: просто дать оценку радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, интересующей исследователя территории или дать исчерпывающую информацию о пригодности этой территории для дальнейшего ее использования в хозяйственной деятельности. Решение последней задачи требует применения БДК, оснащенного различной дозиметрической аппаратурой и устройством передачи информации в режиме реального времени (по радиоканалу) в аналитический центр для ее дальнейшей обработки [9].

Так для исследования естественной аномалии, обусловленной высоким содержанием природных радионуклидов, в работе [14] использовался сцинтилляционный кристалл германата висмута (BGO)³, разрешающая способность которого по γ -излучению с энергией 662 кэВ (^{137}Cs) составляет $\sim 9,0 - 9,8\%$. Этот сцинтиллятор оказывается эффективнее NaI(Tl) за счет отсутствия гигроскопичности и высокой плотности ($7,13 \text{ г/см}^3$), в результате чего основной вклад в поглощение рентгеновских фотонов с энергией в диапазоне 50 – 200 кэВ в BGO вносит фотоэффект (вклад комптон-эффекта и рэлеевского рассеяния при $E_\gamma < 100 \text{ кэВ}$ мал по сравнению с фотоэффектом). К другим наиболее эффективным сцинтилляторам отечественной разработки (институтом физики твердого тела РАН) можно отнести сцинтиллятор на основе кристалла $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, энергетическое разрешение которого по энергии γ -излучения ^{137}Cs составляет $\sim 3\%$, плотность – в 1,44 раза больше плотности NaI(Tl), время высвечивания в 12,5 раза меньше высвечивания кристалла NaI(Tl) и составляет 16 нс, а световой выход в 1,7 раз выше, чем у NaI(Tl). К недостаткам следует отнести гигроскопичность и радиоактивность, обусловленную содержанием в природном Лантане изотопа $^{138}\text{La}_{57}$ ($T_{1/2} = 1,35 \cdot 10^{11} \text{ лет}$, $E_{\gamma 1} = 1,4354 \text{ МэВ}$, с квантовым выходом $\nu_1 = 67,9\%$ и $E_{\gamma 2} = 0,7879 \text{ МэВ}$, $\nu_2 = 32,1\%$), вклад γ -излучения которого может внести определенную погрешность при низкофо-новых измерениях исследуемых сред или материалов.

На фоне приведенных характеристик кристаллов, рассмотренных выше γ -спектрометров, радиационные характеристики ксенонового γ -спектрометра с рабочим телом в виде инертного газа ксенона, наполняющего ионизационную камеру при давлениях в 30 – 40 атм., выглядит в значительно лучшем свете. Действительно, ксеноновый γ -спектрометр – ксеноновый γ -детектор (КГД) при своей работе не требует низкотемпературного охлаждения, в отличие от германиевых полупроводниковых детекторов, имеет достаточно высокое энергетическое разрешение по энергии γ -излучения ^{137}Cs (1,7 – 2%), что обусловлено большим атомным номером ксенона $Z = 54$ и, как указывалось, высокой его плотностью газа в рабочей камере [15]. Этот детектор может работать в температурном диапазоне $-20 - +180^\circ\text{C}$; обладает высокой радиационной стойкостью по потоку нейтронов $\sim 10^{12} \text{ н/см}^2$. Эффективность регистрации γ -излучения может быть существенно повышена за счет увеличения объема камеры, но это, с другой стороны, можно отнести и к его недостаткам.

³ Германат висмута $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) — сцинтилляционный материал, широко применяемый в виде кристаллов в ядерной физике, физике высоких энергий, геофизике, низкофоновой спектроскопии, в ядерной медицине и в других областях.

Следует отметить, что возможность регистрации КГД спектрального состава γ -излучения радиоактивной примеси, распространяющегося в атмосфере или загрязняющей подстилающую поверхность, совместно с измерением мощности дозы, дают полную возможность получить оценки радионуклидного состава, загрязняющего ту или иную среду, оценить дозовые нагрузки на персонал и население и привести другие радиационные характеристики, определяющие экологическую и радиационную безопасность окружающей среды.

Получив определенное представление о сценариях оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды в результате радиационной аварии на ОИАЭ, математической модели оценки ее радиоактивного загрязнения, и о расчетных методах, а также о специальных средствах ее радиационного контроля, представляющих собой беспилотные радиоуправляемые аппараты, оснащенные спектрометрическим и дозиметрическим оборудованием, предназначенным дистанционно (без непосредственного контакта человека с радиоактивными материалами) осуществлять радиационный контроль, рассмотрим вопрос оптимизации маршрутов следования БПЛА с выделением «горячих» точек. Следует отметить, что на данный момент вопросам, связанным с оптимизацией маршрута следования БДК, не уделялось достаточного внимания. С этой целью, будем рассматривать сценарий второго вида, о котором говорилось ранее. Суть сценария состоит в том, что радиоактивное загрязнение подстилающей поверхности в этом случае может носить случайный характер, что не дает возможности применить приведенный ранее математический аппарат для оценки такого рода радиоактивных пятен, которые, для примера, приведены на рисунке 14 и выделены цифрами.

В этом случае оценку радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности при использовании БДК целесообразно провести в два этапа. На первом, для получения общей картины, необходимо поднять аппарат как можно выше, но без потери чувствительности γ -детекторов, и зафиксировать координаты этих «пятен». На втором – проложить всевозможные маршруты для БДК между «пятнами», полагая таковым только прямые линии, соединяющие «пятна», таким образом, что любой путь, состоящий из множества отрезков, представлял бы собой линию конечной длины:

$$L_j = \sum_{i=1}^{N_j} l_{i,j},$$
 где $l_{i,j}$ – прямолинейные отрезки пути, сумма которых будет определять их

общую длину L_j ; N_j – целое число, определяющее количество элементарных отрезков. Такой путь решения задачи представлен на рисунке 14 в виде двух (выделены синим и красным) вариантов выбора пути: $L_1 = l_{0,1} + l_{1,2} + l_{2,3} + l_{3,4} + l_{4,5} + l_{5,6} + l_{6,0}$; $L_2 = l_{0,1} + l_{1,6} + l_{6,5} + l_{5,4} + l_{4,3} + l_{3,2} + l_{2,0}$. Поскольку координатная сетка задана, то и расстояния $l_{i,j}$ этих маршрутов легко найти. Тогда при известной средней скорости полета БПЛА V_{cp} нетрудно найти время, которое будет затрачено при полете на каждом из путей $T_j = L_j/V_{cp}$, а при заданном расходе топлива на час пути (K , кг/ч) общая масса топлива, израсходованного на пути L_j определится произведением: $M_j = K \cdot T_j$, где $j = 1, 2, \dots, M$, $M \gg 1$. Выбирая из найденной совокупности M_j наименьшее, определим и оптимальный путь следования, по которому следует задавать полетное задание. Очевидно, что с ростом числа радиационных пятен на подстилающей поверхности второй сценарий ее сканирования будет наиболее целесообразным, поскольку число связей между пятнами возрастет. При этом средняя или оптимальная высота сканирования h_D , на которой более детально можно провести измерения радиационных характеристик при радиоактивном загрязнении подстилающей поверхности, в этом случае может составлять 60 м, согласно рекомендациям работ [2, 9]. Таким образом, выбирая минимальное значение M_j , находят оптимальное решение транспортной задачи, позволяющей минимизировать финансовые затраты на приобретение топлива и время, необходимое для принятия решений при ликвидации последствий радиационной аварии.

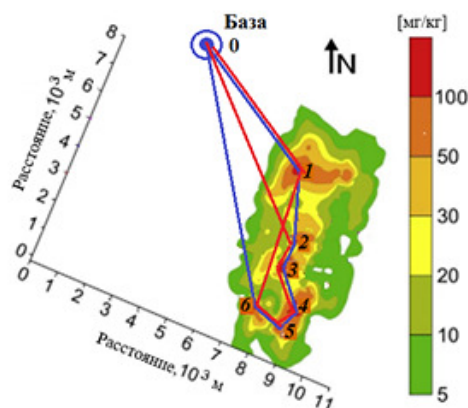


Рисунок 14 – Иллюстрация маршрута следования БДК в рамках задачи оптимизации маршрута с учетом экономии топлива [Illustration of the UDC route within the framework of the route optimisation task taking into account fuel savings]

Иной метод выбора маршрута, приведенный на рисунке 15, был предложен в работе [7] на территории Японии. В качестве маршрута следования была выбрана «змейка» (серо- белая линия на рис. 15). Данный маршрут, очевидно, также является предварительным, поскольку позволяет охватить, достаточно большую территорию, при сканировании ее радиоактивного загрязнения, однако при выборе данного пути следования не учитывались такие параметры ДК, как его чувствительность, радиус сканирования и оптимальная высота полета. Именно, поэтому предложенный метод не может претендовать на оптимальный.

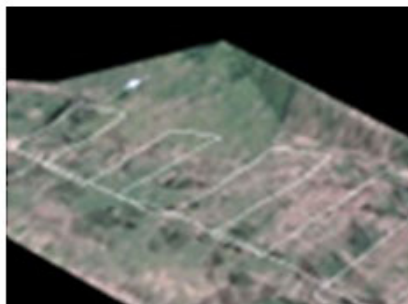


Рисунок 15 – Маршрут следования БДК «змейкой». Япония. Радиационный контроль в регионе АЭС Фукусима-1 [The route of the UDC serpentine pattern. Japan. Radiation control in the Fukushima-1 nuclear power plant region]

В работах [7, 14, 16], в качестве высоты полета зачастую принималась значение 9-12 метров, что является не всегда применимой высотой, поскольку на пути следования БДК могут встречаться препятствия выше этого значения. Стоит отметить, что в работе [14] в том числе производились измерения и на высоте 40 метров, однако, как отмечали авторы, показания ДК, выполненного на основе ВГО, в этом случае были близки к фоновым значениям. Последнее, скорее всего, свидетельствовало о низкой величине активности подстилающей поверхности. В таких случаях, естественно, просто необходимо уменьшить высоту полета сканирования подстилающей поверхности.

При сканировании подстилающей поверхности, в первую очередь, возникает вопрос об обосновании высоты сканирования и погрешности, обусловленной ограниченностью радиуса сканирования. В работах [2, 9, 17], в которых БДК представлен в виде комплекса, содержащего ксеноновый γ -спектрометр и γ -детектор типа УДМГ, для решения этих вопросов предлагают следующие рекомендации: оптимальная высота полета h_D составляет 40 – 60 метров; радиус сканирования БДК

связан с высотой h_D соотношением $R = 3h_D$ и требованием равномерного распределения поверхностного загрязнения на площади $S = \pi R^2$. Последнее удастся удовлетворить с погрешностью 13%, что оказывается меньше погрешности дозиметрии (15 – 20%). С учетом этих рекомендаций предлагаемый маршрут «змейка» может быть модернизирован таким образом, чтобы расстояние l между двумя ближайшими прямыми путями следования составляли не более $2R$ (см. рис. 16).

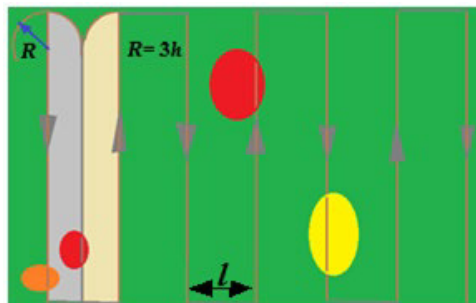


Рисунок 16 – Маршрут «змейка» при радиоактивном загрязнении подстилающей поверхности, имеющем случайный характер и обусловленный техногенными причинами [Serpentine route for accidental, man-made radioactive contamination of the underlying surface]

Оценка радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности на основе показаний БДК

Как было показано в [7, 14], показания БДК страдают существенным недостатком – отсутствием зависимости от высоты сканирования, что ограничивает возможность указанных измерений для непосредственных оценок поверхностной активности радиоактивного загрязнения. Решение этой проблемы было предложено в работах [2, 9, 17] и основано на достаточно простом принципе сравнения измеряемой мощности дозы, создаваемой радиоактивным загрязнением подстилающей поверхности, и ее расчетной величиной, представленной в виде аналитической формулы, содержащей высоту сканирования h_D , и поверхностную активность $\chi(x_0, y_0)$, зависящую от точки наблюдения, в виде постоянной величины, где x_0, y_0 – координаты точки наблюдения. Требование равномерного распределения поверхностной активности в круге диаметром $2R$ дает возможность получить простую формулу для концентрации радионуклида, которая на выделенной площадке определяется выражением:

$$\chi(x_0, y_0, E_i) = \frac{D'_{tot}(x_0, y_0) \cdot p_i}{\Phi(E_i, p_i) \left\{ \int_{h_{эф}}^{\infty} \frac{\exp[-\mu(E_i)U]}{U} dU - \int_{h_{эф}\sqrt{m^2+1}}^{\infty} \frac{\exp[-\mu(E_i)U]}{U} dU + \frac{a_i}{1-b_i} \exp\left[\mu(E_i)h_{эф}(b_i-1)\sqrt{m^2+1}\right] \right\}}$$

где: $\Phi(E_i, p_i) = 2\pi \cdot 1,458 \cdot 10^5 \sum_{i=1}^N \gamma(E_i) E_i v(E_i) \beta(E_i) \psi(E_i) p_i$; $D'_{tot}(x_0, y_0, h_D)$ – мощность дозы γ -излучения, регистрируемая γ -детектором на высоте h_D ; p_i – вес радионуклида, определяемый выражением:

$$p_i = \left[\alpha(E_i) A(E_i) \Delta(E_i) / v_i \right] / \sum_{i=1}^N \left[\alpha(E_i) A(E_i) \Delta(E_i) / v_i \right],$$

$\alpha(E_i)$ – коэффициент, характеризующий энергетическую зависимость ксенонового спектрометра, определяемый экспериментально по монолиниям γ -излучения $A(E_i)$;

$\Delta(E_i)$ – амплитуда и полуширина пика, измеряемая на его полувысоте, обработанного спектра; $\nu(E_i)$ – квантовый выход энергии γ -излучения радионуклида; $\gamma(E_i)$, $\mu(E_i)$ – коэффициенты поглощения и линейного ослабления γ -излучения; $\beta(E_i)$ – энергетическая чувствительность γ -детектора, определяемая экспериментально; m – необязательно целое число; a_i , b_i – безразмерные параметры формулы Бергера, зависящие от энергии гамма-излучения [18]; $\psi(E_i)$ – поправочный коэффициент.

Заключение

Таким образом в работе представлен анализ методов радиационного контроля подстилающей поверхности при ее радиоактивном загрязнении. Анализ проводится в рамках двух сценариев, один из которых основывается на условиях радиоактивного загрязнения, обусловленного радиационной аварией на ОИАЭ, что позволяет использовать аппарат и оборудование системы радиационного контроля этого объекта, включая оборудование системы АСКРО, ее метеорологическое оборудование (приборы измерения метеопараметров атмосферы, метеомачту и др.) и программное (физико-математическое) обеспечение, которое дает возможность получить исчерпывающую информацию классов устойчивости атмосферы во время возникновения и развития радиационной аварии, позволяющую, в конечном итоге, получить картину расчетов изолиний радиоактивного загрязнения на карте местности и оценки дозовых нагрузок на персонал и население. Последнее обеспечивает руководителей ОИАЭ информацией для принятия решений с целью ликвидации и минимизации последствий радиационной аварии на объекте.

В рамках другого сценария радиационной аварии, обусловленной техногенными причинами ее происхождения и развития, имеющими случайный характер, рассматривалось решение задачи в два этапа с привлечением БПЛА, оборудованных дозиметрической и спектрометрической аппаратурой. На первом этапе определялись координаты радиоактивных пятен с использованием систем ГЛОНАС и/или GPS, а на втором уже осуществлялся их анализ с привлечением БДК и математического (программного) обеспечения, служащего приложением к подобным системам. В работе показано, что в рамках второго сценария необходимо проводить оптимизацию пути следования при выборе маршрута полета, что приводит к необходимости использовать аппарат задач линейного программирования при оптимизации топлива, используемого БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сосновский, Р.И. Эффективность гибридного мониторинга радиационного загрязнения атмосферы / Р.И. Сосновский, И.М. Левин, Д.Ф. Рау // Атомная энергия. – 1991. – Т. 71, вып. 3. – С. 244-249.
2. Елохин, А.П. Метод бесконтактной оценки радиоактивного загрязнения подстилающей в поверхности в следе радиоактивного выброса / А.П. Елохин, М.В. Жилина, П.А. Пархома // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2010. – Специальный выпуск. – С. 137-145.
3. Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J.F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., Yasunari, T.J., 2012. Atmos. Chem. Phys. 12, 2313-2343.
4. Omoto, A., 2013. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section a: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.
5. Nuclear Accident Independent Investigation Commission, 2012. The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. NAIIC, Tokyo.
6. Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., 2013. Fukushima Accident. Elsevier, Boston.
7. Yuki Sato, Shingo Ozawa, Yuta Terasaka, Kojiro Minemoto, Satoshi Tamura, Kazutoshi Shingu, Makoto Nemoto & Tatsuo Torii. Remote detection of radioactive hotspot using a Compton camera mounted on a moving multi-copter drone above a contaminated area in Fukushima. Journal of nuclear science and technology. 2020, VOL. 57, NO. 6, 734-744.
8. Лайтман, Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы / Д.Л. Лайтман. – Ленинград : Гидромет, 1970. – 340 с.

9. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды: монография / А.П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
10. Алалем, Е.А. Метеорологические характеристики района АЭС в Иордании / Е.А. Алалем, А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов, П.И. Федоров // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3(24). – С. 19-34.
11. Елохин, А.П. Метеорологические характеристики района АЭС «Бушер» в Иране / А.П. Елохин, Е.А. Алалем, А. И. Ксенофонтов // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 4(25). – С. 23-47.
12. Елохин, А.П. Влияние изменения шероховатости подстилающей поверхности на формирование следа при её радиоактивном загрязнении / А.П. Елохин, Е.А. Холодов, М.В. Жилина // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 5. – С. 69-79.
13. Линейное и нелинейное программирование / Под общ. ред. М.Н. Ляшенко. – Киев : Высшая школа, 1975. – 372 с.
14. Ondřej Šálek, Milan Matolína, Lubomír Grycb. Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry // Journal of Environmental Radioactivity 182 (2018) 101–107.
15. С.Е. Улин, В.В. Дмитренко, В.М. Грачев, К.Ф. Власик, З.М. Утешев, А.Д.Ищенко, А.Г. Духвалов (НИЯУ МИФИ); К.А. Боярчук, В.Я. Геча (ФГУП «НПП ВНИИЭМ»). Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов// Вопросы электромеханики Т. 114. 2010, стр. 43-50.
16. Калиберда, И.В. Дистанционные измерения радиационного загрязнения территорий с помощью беспилотного дозиметрического комплекса / И.В. Калиберда, Ф.Ф. Брюхань // Вестник МГСУ. – 2012. – № 4. – С. 186-194.
17. Елохин, А.П. Особенности сканирования подстилающей поверхности при помощи беспилотного дозиметрического комплекса / А.П. Елохин, М.В. Жилина, П.А. Пархома // Атомная энергия. – 2009 – Т.107, вып.2. – С. 103-112.
18. Машикович, В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.

REFERENCES

- [1] H Sosnovsky R.I., Levin I.M., Raou D.F. Effektivnost' gibridnogo monitoringa radiacionnogo zagryazneniya atmosfery [Hybrid Monitoring Efficiency of Atmospheric Radiation Pollution]. //Atomnaya energiya [Atomic Energy]. T.71, vyp. 3. 1991. // Volume 71, no. 3. 1991, pp. 244-249 (in Russian).
- [2] A.P. Elokhin, M.V. Zhilina, P.A. Parhoma. Metod beskontaktnoj ocenki radioaktivnogo zagryazneniya podstilayushchej v poverhnosti v slede radioaktivnogo vybrosa[The method of the Contactless Estimation of Radioactive Pollution of the underlying Surface in the Trace of Radioactive Emission.] // Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki. Special'nyj vypusk. [University News. North Caucasian region. Technical science. Special Issue] 2010, pp.137-145 (in Russian).
- [3] Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J.F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., Yasunari, T.J., 2012. Atmos. Chem. Phys. 12, 2313-2343 (in English).
- [4] Omoto, A., 2013. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section a: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment (in English).
- [5] Nuclear Accident Independent Investigation Commission, 2012. The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. NAIIC, Tokyo (in English).
- [6] Povinec, P.P., Hirose, K., Aoyama, M., 2013. Fukushima Accident. Elsevier, Boston (in English).
- [7] Yuki Sato, Shingo Ozawa, Yuta Terasaka, Kojiro Minemoto, Satoshi Tamura, Kazutoshi Shingu, Makoto Nemoto & Tatsuo Torii. Remote Detection of Radioactive Hotspot Using a Compton Camera Mounted on a Moving Multi-Copter Drone above a Contaminated Area in Fukushima. Journal of Nuclear Science and Technology. 2020. vol.57. №6. 734-744 (in English).
- [8] Lajhtman D.L. Fizika pograničnogo sloja atmosfery. [Physics of the Boundary Layer of the Atmosphere]. Leningrad: Gidromet, [Leningrad: Hydromet. publishing house], 1970, 340 p. (in Russian).
- [9] A.P. Elokhin. Metody i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushchej sredy: Monografiya. [Methods and Means of Radiation Monitoring Systems of the Environment: Monograph.] M.: NIYAU MIFI [Moscow: NRNU MEPhI], 2014. 520 p. (in Russian).
- [10] E.A. Alalem, A.P. Elokhin, A.I. Ksenofontov, P.I. Fedorov. Meteorologicheskie harakteristiki rajona AES v Iordanii. [Meteorological Characteristics for the NPP Site in Jordan] Global'naya Yadernaya Bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2017 No. 3 (24), pp. 19-34 (in Russian).

- [11] A.P. Elokhin, E.A. Alalem, A. I. Ksenofontov. Meteorologicheskie karakteristiki rajona AES "Bushehr" v Irane. [Meteorological Condition of the Bushehr NPP Area, Iran.] Global'naya Yadernaya Bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2017 No.4 (25), pp.23-47 (in Russian).
- [12] A.P. Elokhin, E.A. Holodov, M.V. Zhilina. Vliyanie izmeneniya sherohovatosti podstilayushchej poverhnosti na formirovanie sleda pri eyo radioaktivnom zagryaznenii. [Influence of Changes in Underlying Surface Roughness on the Formation of the Track of Radioactive Pollution of the Surface] // Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and Hydrology. 2008, No. 5, pp. 69-79 (in Russian).
- [13] Linejnoe i nelinejnoe programmirovaniye. [Linear and Non-Linear Programming]/edited by M.N. Lyashenko. Kiev: Vishcha shkola [Kiev: Higher School], 1975. 372 p. (in Russian).
- [14] Ondřej Šálek, Milan Matolín, Lubomír Gryb. Mapping of Radiation Anomalies Using UAV Mini-Airborne Gamma-Ray Spectrometry // Journal of Environmental Radioactivity 182 (2018) 101-107 (in English).
- [15] S.E. Ulin, V.V. Dmitrenko, V.M. Grachev, K.F. Vlasik, Z.M. Uteshev, A.D. Ishchenko, A.G. Duhvalov (NIYaU MIFI); K.A. Boyarchuk, V.Ya. Gecha (FGUP "NPP VNIIE"). Gamma-spektrometriya na szhatom ksenone dlya obnaruzheniya i identifikatsii radioaktivnykh i delyashchihsya materialov [Compressed Xenon γ -ray Spectrometers for the Detection and Identification of Radioactive and Fissile Materials].// Voprosy elektromekhaniki T. 114. [Problems of Electromechanics. Vol. 114], 2010, pp. 43-50 (in Russian).
- [16] Kaliberda I.V., Bryuhan' F.F. Distantsionnye izmereniya radiatsionnogo zagryazneniya territorij s pomoshch'yu bespilotnogo dozimetricheskogo kompleksa [Remote Measurements of Radiation Contamination of Territories Using an Unmanned Dosimetric Complex]// Vestnik MGSU [MGSU News], 2012. No.4. P.186-194 (in Russian).
- [17] A.P. Elokhin, M.V. Zhilina, P.A. Parhoma. Osobennosti skanirovaniya podstilayushchej poverhnosti pri pomoshchi bespilotnogo dozimetricheskogo kompleksa. [Peculiarities of Scanning of the Underlying Surface with Pilotless Dosimeter complex] // Atomnaya energiya [Atomic Energy], Volume107, No. 2, pp.103-112 (in Russian).
- [18] Mashkovich V.P., Kudryavceva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchih izluchenij. Spravochnik. [Protection Against Ionizing Radiation. Directory. Reference Book] M.: Energoatomizdat, [Moscow: Energoatomizdat], 1995, 496 p. (in Russian).

Methods of Assessing Radioactive Contamination of Underlying Surface Using Unmanned Dosimeter System

I.A. Rodionov¹, A.P. Elokhin²

National Research Nuclear University MEPhI, kashirskoe highway, Moscow, Russia, 344000

¹e-mail: uxanson@bk.ru

²ORCID iD: 0000-0002-7682-8504

ResearcherID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Abstract – The paper considers methods of estimating radioactive contamination of the underlying surface, based on two scenarios. In the first one the analysis of contamination is performed within the framework of a geophysical model of the surface layer of the atmosphere, while the transport of radioactive admixtures, which causes contamination of the underlying surface, is calculated within the turbulent diffusion model. The second scenario consists of an analysis of the radioactive contamination of the underlying surface, which has a random nature due to technogenic causes, and its implementation is carried out by means of an unmanned dosimetric complex (UDC). The latter allows to considerably reduce direct human involvement in radiation reconnaissance of the territory. The work draws attention to the program of drone flight (altitude, route, etc.), composition of the dosimetric complex, mathematical support of the unmanned dosimetric complex, mathematical models of atmospheric meteorological parameters estimation underlying the model of surface layer and radioactive admixture distribution in the atmosphere.

Keywords: radiation monitoring, radioactive contamination, environment, underlying surface, unmanned aerial vehicle, unmanned dosimetry system.