

---

---

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

---

---

УДК [657.471+658.7]:504.5:621.039.58

**ОЦЕНКА МАТЕРИАЛЬНЫХ ЗАТРАТ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ  
ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ  
РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ НА ОИАЭ**

© 2016 А.П. Елохин, И.А. Стародубцев

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

В работе на примере некоторой гипотетической аварии на объекте использования атомной энергии (ОИАЭ) представлен сценарий, определяющий последовательность работ, связанных с регистрацией ионизирующего излучения, обусловленного выходом газоаэрозольной радиоактивной примеси в атмосферу, а также оценкой радиоактивного загрязнения воздушного бассейна и подстилающей поверхности при распространении примеси по ветру. Проводится оценка дозовых нагрузок на персонал и население региона, оказавшегося под факелом радиоактивного выброса, и работы по ликвидации последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды. Приводится математическая формулировка постановки задачи по оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды и методы ее решения, а также оценка ущерба окружающей среде, включающей населенные пункты, сельскохозяйственные угодья, парки, заповедники и естественные природные заказники.

*Ключевые слова:* радиационная авария на объекте использования атомной энергии, регистрация ионизирующего излучения, факел радиоактивного выброса, оценка радиоактивного загрязнения воздушного бассейна и подстилающей поверхности, оценка дозовых нагрузок на персонал и население региона, оценка ущерба окружающей среде.

Поступила в редакцию 15.07.2016 г.

Развитие атомной промышленности в XX веке сопровождалось значительными радиационными авариями, например, на химкомбинате НПО «Маяк» в СССР 29.09.1957, на заводе Селлафильд (Уиндскейл, Великобритания) 10.10.1957, на АЭС «Tree Mile Island» (штат Пенсильвания, США) 28.03.79, на Чернобыльской АЭС на Украине 26.04.86 и пр. [1], которые привели к значительному загрязнению окружающей среды. Подобная эстафета, к сожалению, продолжилась и в XXI веке на японской АЭС Фукусима-1. Эти примеры наглядно показывают, что увеличение числа производств, связанных с атомной промышленностью, ведет к росту вероятности возможных радиационных аварий, обусловленных, во многих случаях, человеческим фактором. Из последнего также следует, что дальнейшее развитие энергетической и других отраслей промышленности, как в развитых, так и в развивающихся странах, нуждающихся в электроэнергии, приведет к росту строительства атомных электростанций\*, поскольку альтернативные источники энергии либо маломощны, а их технологии недостаточно развиты для широкого промышленного использования (например, водородная энергетика [2, 3]), либо эти источники привязаны к

---

\* Электростанции, работающие на угле, не рассматриваются, поскольку при штатной работе АЭС оказывается значительно чище с экологической точки зрения. Электростанции, работающие на газе, наиболее экологичны, чем на угле, но спрос на газ, несмотря на энергетический кризис в мире, адекватен росту финансовых затрат на этот продукт, что эквивалентно использованию в качестве топлива денежных ассигнаций.

географическим особенностям региона (энергоустановки на основе использования солнечной энергии, геотермальные, ветровые, приливные электростанции и др.) и могут служить лишь в качестве региональных источников энергии. Напротив, гидроэлектростанции могут достигать высокой мощности, но при создании водохранилищ возникает значительное количество отчуждаемых (затопляемых) земель, в том числе и плодородных сельскохозяйственных, что, несомненно, оказывает негативное влияние, как на сельское хозяйство в целом, так и на экологию наземных и водных экосистем.

С другой стороны, рост строительства атомных электростанций в соответствии с указанными вероятностными оценками может привести к росту радиационных аварий, связанных с выходом радиоактивных продуктов в окружающую среду. На это указывают такие факторы, как отсутствие соответствующего опыта по эксплуатации таких сложных производств как АЭС у специалистов «персонала АЭС» развивающихся стран, которое может повысить влияние «человеческого фактора» при возникновении и развитии радиационной аварии. Несомненно, что системы автоматизированного контроля радиационной обстановки окружающей среды, действующие на каждой из пускаемых даже в рамках физического пуска АЭС, оснащенные стандартным и нестандартным беспилотными летательными радиоуправляемыми аппаратами дозиметрического контроля, которые позволят минимизировать последствия аварий, где радиоактивные продукты могут выйти в окружающую среду [4], но указанная процедура (минимизация последствий) не избавит от необходимости ликвидации этих последствий. Таким образом, после окончания активной фазы радиационной аварии встает задача оценки ущерба, как окружающей среде загрязненного региона, так и населению, проживающему в этом регионе. Последняя задача частично рассматривалась в работе [5].

В настоящей работе, наряду со сценарием, определяющим последовательность работ, связанных с регистрацией ионизирующего излучения, обусловленного выходом радиоактивной газоаэрозольной примеси в атмосферу, оценкой радиоактивного загрязнения воздушного бассейна и подстилающей поверхности при распространении последней по ветру, оценкой дозовых нагрузок на персонал и население региона, оказавшегося под факелом радиоактивного выброса, и ликвидацией последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды, приводится математическая формулировка постановки задачи и методов ее решения, а также оценка ущерба на примере гипотетической аварии на объекте использования атомной энергии (ОИАЭ).

Рассмотрим гипотетическую аварию с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу, в виде радиоактивного облака. В соответствии со сказанным выше, будем считать, что система АСКРО, в рамках лаборатории внешней дозиметрии обеспечена соответствующими приборами и оборудованием, представленным на рисунке 1, которое предназначено для целей сбора и обработки информации по радиоактивному загрязнению окружающей среды, оценки дозовых нагрузок на персонал и население, передачи обработанной информации верхним эшелонам власти для принятия решений.

Оборудование, представленное иконками 1–9, является составной частью системы АСКРО и служит для получения исходной информации, определяющей метеорологические характеристики атмосферы, в которой распространяется газоаэрозольная радиоактивная примесь.

Блок 10 состоит из специального оборудования, содержащего блок первичной обработки информации нижнего уровня, представляющего результаты показаний датчиков АСКРО, и блок верхнего уровня, содержащий специальное программное обеспечение, предназначенное для оценки и прогнозирования радиоактивного загрязнения окружающей среды в условиях радиационных аварий, позволяющего

провести ряд расчетов, результаты которых представлены иконками 11–18.

Иконка 3 соответствует показаниям технологических датчиков, к которым относятся датчики температуры и давления, служащие для определения скорости воздушного потока, проходящего по венттрубе, датчик мощности дозы  $\gamma$ -излучения,  $\gamma$ -спектрометр, с помощью которых может быть определены объемная активность газоаэрозольной радиоактивной примеси, переносимой в трубе воздушным потоком, ее радионуклидный состав и, в конечном итоге, эффективная высота выброса [8], а также величина мощности выброса радионуклидов в атмосферу.

Иконка 4 соответствует специальному оборудованию, с помощью которого определяют скорость сухого осаждения радиоактивной примеси на подстилающую поверхность и характер ее шероховатости, определяющую граничные условия, при решении задачи переноса радиоактивной примеси в атмосфере [9].

Иконки 5, 6 отвечают специальному оборудованию по  $\gamma$ -спектрометрии и измерению мощности дозы  $\gamma$ -излучения системой датчиков, расположенных на промплощадке и в санитарно-защитной зоне АЭС или любого другого ОИАЭ.

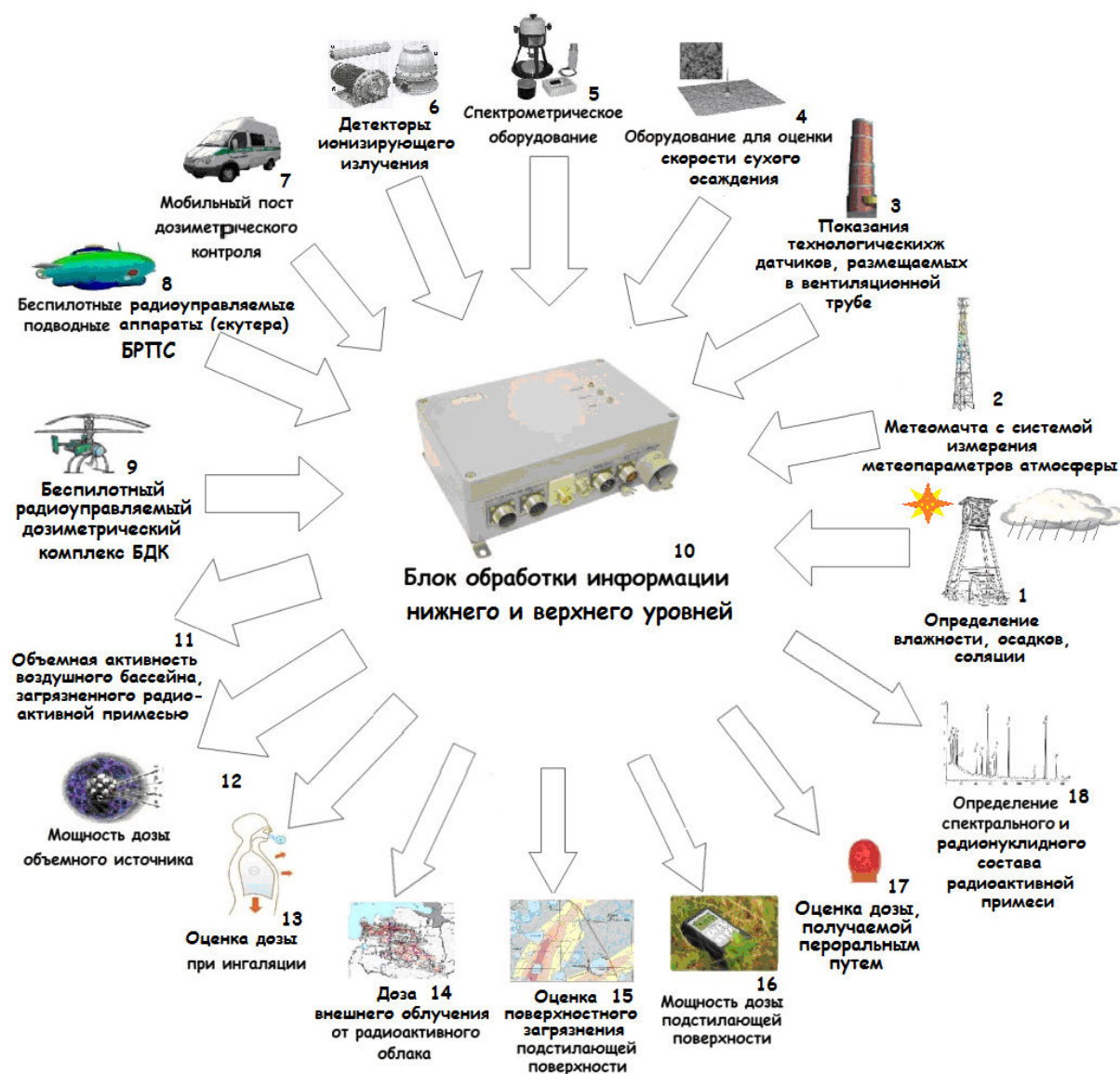


Рис. 1. – Приборное обеспечение и выходные параметры системы АСКРО, используемой для прогнозирования и оценки последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды

Иконки 7-9, имеющие непосредственное отношение к службе внешней дозиметрии системы АСКРО, представляют собой следующее:

7 – мобильные посты дозиметрического контроля (мобильная лаборатория) высокой проходимости, предназначенные для проведения работ дозиметрической разведки (измерения мощности дозы в условиях радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности и отбора проб для оценки радионуклидного состава) в малопроезжих местах, в лесах, полях, бездорожье [10];

8, 9 – беспилотные радиоуправляемые средства, используемые для оценки радионуклидного состава при радиоактивном загрязнении донной поверхности водных акваторий, например, пруда – охладителя, водных акваторий, баз подводного флота и т.д., (8 – беспилотный радиоуправляемый подводный скутер) или радиоактивного загрязнения воздушного бассейна и подстилающей поверхности (9 – беспилотный дозиметрический комплекс) [4];

Иконки 11–18 соответствуют результатам расчетов, осуществляемых блоком обработки информации 10. Они представляют собой следующее:

11 – результаты расчета пространственного распределения объемной активности газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере при возникновении радиационной аварии, обусловленной потерей управления источником [11];

12 – характеристика мощности дозы внешнего облучения, создаваемого радиоактивным облаком или факелом выбросов, распространяющихся в атмосфере;

13 – оценка дозовой нагрузки при вдыхании загрязненного воздуха персоналом или населением, оказавшимся в зоне распространения радиоактивного облака;

14 – оценка дозовой нагрузки внешнего облучения для персонала или населения, оказавшегося в зоне распространения радиоактивного облака;

15 – оценка поверхностной активности подстилающей поверхности после прохождения радиоактивного облака;

16 – оценка мощности дозы, создаваемой загрязненной подстилающей поверхностью;

17 – оценка дозы населения, получаемой пероральным путем, т.е. в результате потребления растений и мяса животных, оказавшихся в зоне радиоактивного загрязнения;

18 – оценка радионуклидного состава газоаэрозольной радиоактивной примеси, формирующей объемный источник, или радиоактивных аэрозолей, выпавших на подстилающую поверхность, путем определения спектрального состава  $\gamma$ -излучения.

Информация с приборов, описанных иконками 1-9, поступает в блок или систему блоков обработки данных. После первичной обработки данные представляют собой ряд параметров, которые определяют исходные данные для систем уравнений, описывающих перенос радиоактивной примеси в атмосфере, численное решение которых и является результатами прогноза, описывающего радиоактивное загрязнение воздушного бассейна и подстилающей поверхности, а также определяющего дозовые нагрузки на персонал и население в условиях радиационных аварий.

Автоматизированная система контроля радиационной обстановки позволяет определить уровни радиоактивного загрязнения в окружающей среде, дозовые нагрузки на персонал и население, а также предоставить в режиме реального времени текущую информацию по развитию радиационной аварии, как оперативной службе, так и руководству верхних эшелонов власти для принятия решений с целью минимизации последствий аварии.

Остановимся подробнее на выходных расчетных параметрах, которые

представлены иконками 10-18, ограничиваясь, для простоты, стационарным точечным<sup>1</sup> источником выбросов радиоактивной примеси в атмосферу, полагая, что в указанных условиях сработали все датчики, предоставляя все необходимые (ранее указанные) параметры, определяющие граничные условия переноса радиоактивной примеси в атмосфере, и необходимые характеристики, определяющие радионуклидный состав примеси, а также метеорологические характеристики атмосферы, определенные в рамках модели ее приземного слоя [1,4,7].

Рассматривая в качестве субстанции объемную активность газоаэрозольной радиоактивной примеси, загрязняющей окружающую среду,  $q(x, y, z)$  (Ки/м<sup>3</sup>), метеопараметры атмосферы:  $u(z)$  – продольную скорость воздушного потока (поперечную скорость полагаем равной нулю),  $k(z)$  – коэффициент турбулентной диффузии и  $b(z)$  – энергию турбулентных пульсаций, определяемые, как указывалось, в рамках модели приземного слоя атмосферы, находим, используя математический аппарат работы [6].

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

где  $z_n = z/L$  – безразмерная высота;  
 $L$  – масштаб Монина - Обухова (масштаб приземного слоя атмосферы);  
 $b_n$  – безразмерная энергия турбулентных пульсаций;  
 $c$  – постоянная;  
 $u_n$  – безразмерная скорость ветра;  
 $v_*$  – динамическая скорость;  
 $\chi = 0,4$  – постоянная Кармана;  
 $\theta$  – потенциальная температура  $\theta = T(1000/P)^{0,29}$  ( $T, ^\circ K; P$  мбар,  
 $\theta_n$  – ее безразмерная величина  $\theta_n = -\chi \theta / \theta_*, \theta_* = P_0 / (\rho c_p v_*)$ ,  
 $P_0$  – поток тепла,  $\rho$  – плотность воздуха,  $c_p$  – удельная теплоемкость);  
 $\alpha_T = k_T/k$  – отношение коэффициента турбулентности для тепла и количества движения.

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

$$k_n = 1 - y^4, \quad (3)$$

где  $y$  – табулированное значение для различных  $z_n$ .

Для безразмерных  $u_n, b_n$ , получаем следующие выражения:

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

$$b_n = y^2; \quad (5)$$

$$\theta_n = \int_{z_{0n}}^{z_n} \frac{dz_n}{\alpha_T k_n}; \quad (6)$$

$$L = - \frac{v_*}{\chi (g/T_0) (P_0 / \rho c_p)}, \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  
 $T_0$  – температура на уровне земли.

<sup>1</sup> Сравнительные характеристики выброса радиоактивной примеси от точечного (сосредоточенного) и объемного источников, а также особенности распределения объемной активности и мощности дозы внешнего облучения, приведенные в работе [4]

Уравнение (2) относительно  $y$  имеет аналитическое решение Феррари [1,4,12] и зависит от  $z_n$  следующим образом:

$$y = \begin{cases} \frac{-\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B) - 4 \left[ \frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 + 3} \right]}}{2}; & z_n \geq -4/3; \\ \frac{\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B) - 4 \left[ \frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 + 3} \right]}}{2}; & z_n \leq -4/3, \end{cases} \quad (8)$$

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

Таким образом, зависимости скорости ветра  $u(z)$ , коэффициента турбулентной диффузии  $k(z)$  и энергии турбулентных пульсаций  $b(z)$  как функций высоты  $z$  в рамках модели приземного слоя атмосферы могут быть успешно найдены, если известны параметры приземного слоя  $v_*$  и  $L$ . Значения последних находят, используя методику градиентных наблюдений над скоростью ветра и температурой следующим образом [4, 6]. Измеряют на двух уровнях скорость ветра и температуру, например,  $z_1 = 2H$ ,  $z_2 = 0,5H$  ( $H = 1\text{ м}$ ). Находят разности  $Du = u(z_1) - u(z_2)$ ;  $D\theta = \theta(z_1) - \theta(z_2)$ . Используя формулу (7) и выражение для скорости ветра и температуры через безразмерные величины, получаем  $P_0/\rho c_p = -\chi v_* D\theta/D\theta_n$ ;

$$Du = v_* Du_n / \chi; \quad (Du/Du_n)^2 = (g/T_0)L(D\theta/D\theta_n), \quad (9)$$

где  $u_n$ ;  $\theta_n$  – табулированные значения универсальных функций, вычисленных для различных  $z_n$  ( $z_n = z/L$ ) [6],

$Du_n$ ;  $D\theta_n$  – их разность.

Поскольку  $Du$ ;  $D\theta$  – измеряемые величины, а  $Du_n$ ;  $D\theta_n$  зависят от масштаба Монина – Обухова  $L$ , то выражение (9) есть неявная функция  $L$ . Для нахождения  $L$  задаются некоторым значением  $L_{\max}$  и варьируют его, например,  $L_i = DL \cdot i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $DL = L_{\max}/N$  до тех пор, пока разность или относительная погрешность:

$$\left| \left( \frac{Du}{Du_n} \right)^2 - \frac{g}{T_0} L \frac{D\theta}{D\theta_n} \right|, \quad \varepsilon = \left| \frac{(Du/Du_n)^2 - (gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)}{(Du/Du_n)^2} \right| \cdot 100\% \quad (10)$$

не будет минимальной (в пределе  $\varepsilon \rightarrow 0$ ). Найденное значение  $L^*$ , при котором  $\varepsilon$  минимальна, и определит искомое значение  $L$ :  $L^* = DL \cdot i^*$ . Определив масштаб Монина – Обухова  $L$  и пересчитав  $z_n$  при фиксированных  $z_1$  и  $z_2$ , т.е., таким образом, пересчитав  $D\theta_n$ ;  $Du_n$ , найдем  $v_*$ :

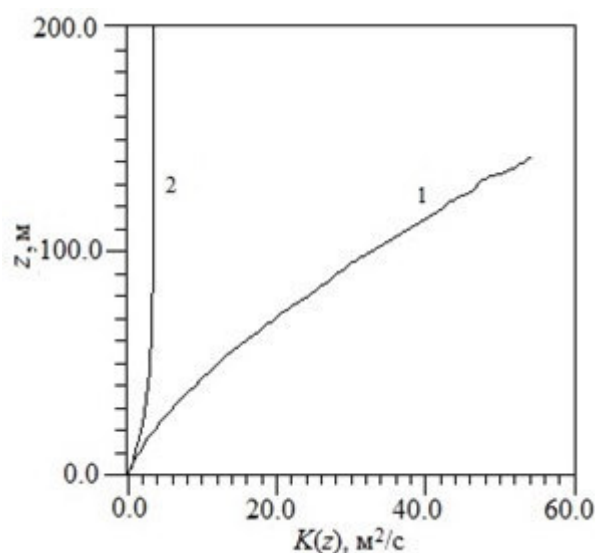
$$v'_* = \chi \frac{Du}{Du_n} \quad (11)$$

или

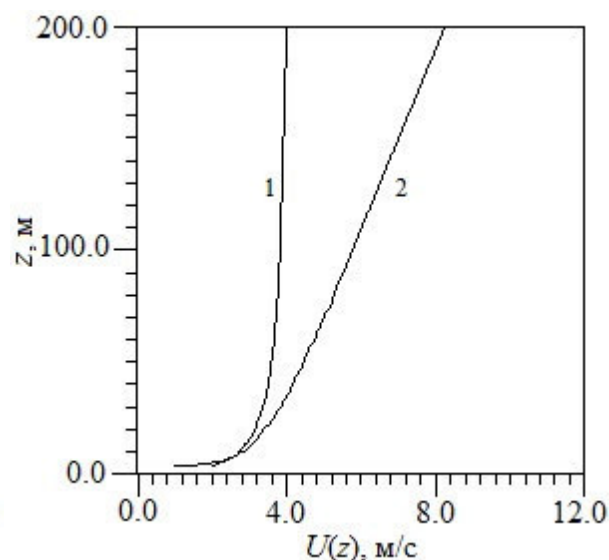
$$v''_* = \chi \sqrt{(gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)}. \quad (12)$$

При стремлении  $\varepsilon \rightarrow 0$   $v_*' \rightarrow v_*''$ . Подобный метод расчета наиболее целесообразен при расчете метеопараметров на ЭВМ. Поскольку параметр  $L$  может быть как  $L > 0$  так и  $L < 0$  (при  $L = 0$  режим движения теряет турбулентный характер [6]), то всевозможные вариации  $L_i$  должны проводиться по формуле:  $L_i = DL(N + L - i)$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, N, N + 1, N + 2, \dots, 2N + 1$ . Последнее позволяет учесть различную стратификацию слоя атмосферы, задаваемую температурным режимом. Для расчета  $u_n(z_n)$ ,  $k_n(z_n)$  при найденном  $L$  целесообразно пользоваться не таблицами, а аналитическим значением  $u$  как функцией  $z_n$ , определяемой формулой (8). Выбор  $u_n$ ,  $\theta_n$  по заданному  $z_n$  осуществляется следующим образом: при известном  $z_n$  находят  $u$ , по которому из таблицы находят значения соответствующие  $u_n$  или  $\theta_n$ . Аналогично находят значения этих функций для другого значения  $z_n$  (другого уровня), вычисляя затем разности  $\Delta u_n$ ,  $\Delta \theta_n$ . После определения параметров  $L$ ,  $v_*$  значения  $u(z)$ ,  $k(z)$  находят по формулам (1). Постоянную  $c_1$  в (4) находят при  $z = z_0$  и  $u(z)|_{z=z_0} = 0$ .

Рассчитанные значения  $u(z)$ ,  $k(z)$  для двух случаев  $L > 0$ ,  $L < 0$  приводятся в виде графиков на рисунках 2, 3.



**Рис. 2.** – Зависимость скорости приземного ветра  $U(z)$  от высоты от подстилающей поверхности (модель приземного слоя атмосферы): 1 - неустойчивое состояние ( $L_0 = -18$ ,  $v_* = 0,32$  м/с,  $\bar{u} = 3,8$  м/с,  $\bar{b} = 1,424$ ); 2 - устойчивое состояние ( $L_0 = 30$ ,  $v_* = 0,26$  м/с,  $\bar{u} = 5,66$  м/с,  $\bar{b} = 0,097$ ), [7].



**Рис. 3.** – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии  $K(z)$  от высоты от подстилающей поверхности при различных состояниях устойчивости атмосферы (в рамках модели приземного слоя атмосферы): 1 - неустойчивое состояние  $L_0 = -18$ ,  $\bar{k} = 17$  м²/с; 2 - устойчивое состояние  $L_0 = 30$ ,  $\bar{k} = 3,5$  м²/с, [7].

Перенос радиоактивной примеси в атмосфере рассчитывают, используя уравнение турбулентной диффузии, полагая при этом, что размывание примеси по оси  $Y$  осуществляется по закону Гаусса, и, определяя, таким образом, объемную концентрацию примеси выражением:

$$q(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp(-y^2/2\sigma_y^2), \quad (13)$$

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

$$S(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(x, y, z) dy = 2 \int_0^{+\infty} q(x, y, z) dy. \quad (14)$$

Таким образом, для объемной концентрации газоаэрозольной примеси получают уравнение:

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (15)$$

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 (кг/с);

$h_{\text{эф}}$  – эффективная высота выброса;

$\sigma$  – постоянная релаксации газоаэрозольной загрязняющей примеси, представляющая собой постоянную вымывания примеси из атмосферы  $\sigma_0$  ( $\text{с}^{-1}$ ), так что  $\sigma = \sigma_0$ ;  $w$  – гравитационная скорость оседания примеси.

В рамках рассматриваемой модели переноса величину  $\sigma_y^2(x)$  представляют в виде:  $\sigma_y^2(x) = \bar{b} x^2 / \bar{u}^2 (1 + ax\bar{b}/\bar{k}\bar{u})$ , где  $\bar{b}$ ,  $\bar{k}$ ,  $\bar{u}$  – усредненные по приземному слою высотой  $H_{\text{пр}}$  с весом  $S(x, z)$  значения энергии турбулентных пульсаций  $b(z)$ , коэффициента турбулентной диффузии  $k(z)$  и скорости ветра  $u(z)$ ,  $a = 0,015$ .

$$\bar{b} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} b(z) \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{\text{пр}}} \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}; \quad \bar{k} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} k(z) \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{\text{пр}}} \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}; \quad \bar{u} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} u(z) \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_0^{H_{\text{пр}}} \left( \int_0^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}.$$

Граничные условия определяются выражениями:

$$S(x, z)|_{x=0} = 0; \quad (16)$$

$$S(x, z)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (17)$$

$$S(x, z)|_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad (18)$$

$$k \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w) S \Big|_{z=z_0}, \quad (19)$$

где  $\beta$  – скорость сухого осаждения газоаэрозольной примеси на подстилающую поверхность;

$z_0$  – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Аналитическое решение этой частной задачи (15) – (19) дается выражением (20), непосредственно объемная активность газоаэрозольной примеси радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, вычисляется по формуле (13), функциональная зависимость  $q(x, y, z)$  в приземном слое атмосферы при  $z = 1,5$  м приведена на рисунке 4.



$$S(x, z) = \frac{M}{2} \exp\left(-\left[\frac{\sigma_0 x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4k\bar{u}} + \frac{w(z-h_{эф})}{2k}\right]\right) \left\{ \frac{\exp(-[z+h_{эф}]^2 \bar{u}/4kx) + \exp(-[z-h_{эф}]^2 \bar{u}/4kx)}{\sqrt{\pi k \bar{u} x}} - \frac{(2\beta-w)}{k\bar{u}} \exp\left[-\frac{(2\beta-w)(z+h_{эф})}{2k} + \left(\frac{2\beta-w}{2k}\right)^2 \frac{kx}{\bar{u}}\right] \times \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{2\beta-w}{2k}\right) \sqrt{kx/\bar{u}} + \frac{(z+h_{эф})}{2\sqrt{kx/\bar{u}}}\right] \right\}, \quad (20)$$

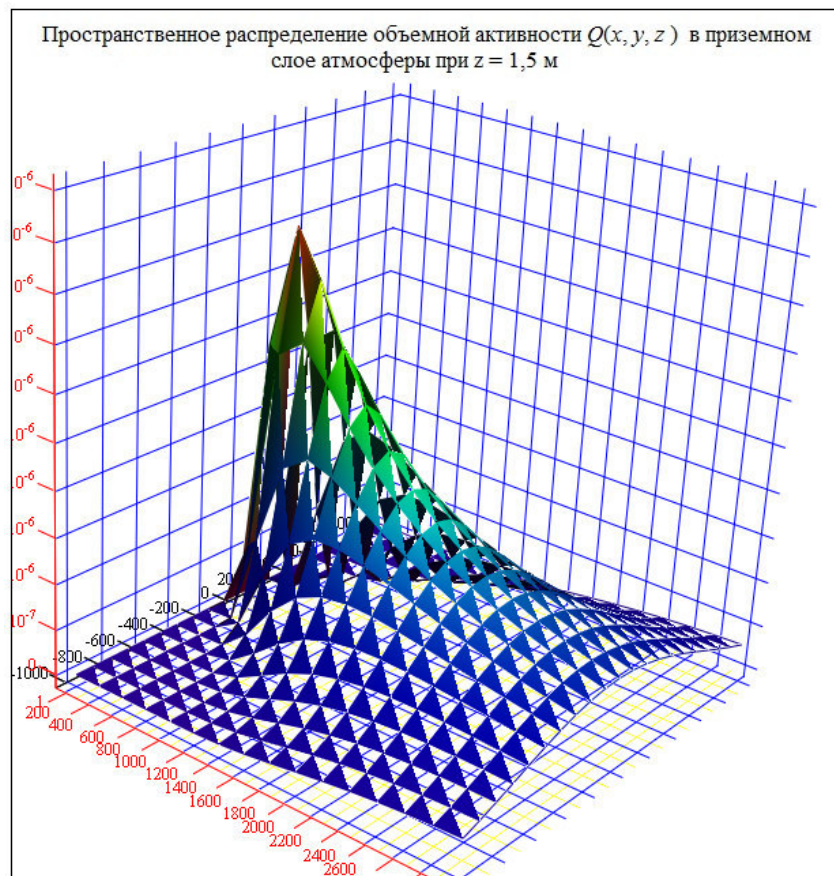


Рис. 4. – Распределение объемной активности газоаэрозольной радиоактивной примеси как функции  $x, y$  при  $z = 1,5$  м

Расчетное распределение объемной активности, представленное на рисунке 4, дает наглядное представление о характере этого распределения, но, к сожалению, точность такого рода распределений не всегда бывает достаточно высокой, поскольку ряд параметров, определяющих функцию распределения  $S(x, z)$  (см. выражение (20)) и дисперсию  $\sigma_y(x)$ , содержат данные, полученные экспериментально, т.е. с определенной погрешностью. Последнее может привести к тому, что на расстояниях уже с 10 км от источника выбросов точность оценки будет превышать порядок величины [13]. Поэтому в условиях радиационных аварий, во-первых, необходимо, по возможности, уточнить состояние устойчивости атмосферы, определяемое с помощью приборов, представленных иконками 1 и 2, используя более надежные технологии измерения [4], и, во-вторых, использовать радиоуправляемые беспилотные средства дозиметрического контроля типа БДК (9), позволяющие провести как дозиметрический, так и радиометрический контроль воздушного бассейна и подстилающей поверхности в режиме реального времени (on-line), а затем использовать известные транспортные

средства (7) для уточнения характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Величина объемной активности, определенная формулами (13), (20), позволяет найти расчетные оценки мощности дозы от объемного источника и поверхностное загрязнение подстилающей поверхности. Таким образом, если  $q(x,y,z)$  – есть решение уравнения (15) с соответствующими граничными условиями и  $Nu_\alpha$  – некоторая совокупность радионуклидов в выбросе  $\alpha = 1, 2, \dots, N$ . Тогда, если  $E_\alpha, \eta_\alpha$  – энергия фотонного излучения какого-либо радионуклида и ее эффективный квантовый выход соответственно,  $\lambda_\alpha, T_\alpha$  – постоянная распада и период полураспада радионуклидов соответственно, а  $Q_{0,\alpha}$  – их начальная активность, то величина мощности дозы внешнего облучения от каждого из радионуклидов, распространяющихся в факеле выбросов или радиоактивном облаке, в общем случае может быть оценена по формуле [14]:

$$D'_\alpha(x_i, y_j, z_k) = 1,458 \cdot 10^3 \mu_\alpha(E_\alpha) E_\alpha \eta_\alpha \int_0^\infty dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_0^\infty q(x, y, z) [B(E_\alpha, R)/R^2] \exp(-\mu(E_\alpha)R) dz, \quad (21)$$

мЗв/час ,

$$\text{где } R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_k)^2};$$

$x_i, y_j, z_k$  – координаты точки наблюдения;

$x, y, z$  – текущие координаты;

$\mu_\alpha(E_\alpha), \mu(E_\alpha)$  – линейный коэффициент поглощения  $\text{м}^{-1}$  и линейный коэффициент ослабления фотонного излучения  $\text{м}^{-1}$  в воздухе соответственно;

$B(E_\alpha, R) = 1 + a(E_\alpha) \cdot \mu(E_\alpha) R \exp(b(E_\alpha) \mu(E_\alpha) R)$  – фактор накопления в воздухе,

$a(E_\alpha), b(E_\alpha)$  – известные функции энергии фотонного излучения [15].

Очевидно, что общая мощность дозы может быть получена суммированием по всем радионуклидам:  $D'_{\text{tot}} = \sum_{\alpha=1}^N D'_\alpha$ . При этом время, необходимое для расчета мощности дозы от одного радионуклида на стандартном РС, может составить 30-60 сек, а для  $N$  радионуклидов в  $N$  раз больше. Понятно, что такой классический подход не может нас удовлетворить, если мы собираемся использовать автоматизированную систему в режиме реального времени. Выход из положения можно найти с помощью следующих соображений. Воспользуемся тем, что зависимость коэффициента поглощения от энергии фотонного излучения в диапазоне энергий фотонов  $0,08 \leq E_\gamma \leq 2$  МэВ слабо выражена [15], а средняя энергия ионизации среды постоянна и составляет  $\approx 33,85$  эВ. Это дает нам полное право воспользоваться понятием среднеэффективной энергией фотонного излучения и других характеристик радионуклидов, распространяющихся в атмосфере факелом выбросов [1,4].

$$\begin{aligned} \bar{E}_v \eta(t) &= \sum_{i=1}^N E_i \eta_i Q_i(t) / \sum_{i=1}^N Q_i(t); \quad Q_i(t) = Q_{0,i} \exp(-\lambda_i t); \\ \lambda_v(t) &= 0,693 / \bar{T}_v(t); \quad \bar{T}_v(t) = \sum_{i=1}^N T_i Q_i / \sum_{i=1}^N Q_i, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $E_v(t); \lambda_v(t); T_v(t)$  – среднеэффективные значения соответственно энергии, постоянной распада и периода полураспада фотонного излучения радиоактивной примеси объемного источника,

представляющего собой облако или факел выбросов;  
 $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $Q_{o,i}, \lambda_i, T_i$  – начальная активность, постоянная распада и период  
 полураспада  $i$ -го радионуклида;  
 $t$  – текущее время.

При таком подходе, очевидно, следует учитывать, что средняя энергия фотонного излучения, равно как и другие характеристики (постоянная распада, период полураспада) будут зависеть как от времени, так и от типа примеси, т.е. представляет ли собой радиоактивная примесь смесь ИРГ и аэрозолей или только аэрозолей. Последнее, очевидно, будет играть существенную роль для оценок мощности дозы внешнего облучения от подстилающей поверхности, загрязненной следом радиоактивных выбросов, а также оценок дозы внутреннего облучения при ингаляции. Несомненно, подобный метод оценки радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды не совсем удобен, поскольку не связывается конкретно с каким-либо радионуклидом и его характеристиками, но это есть не что иное, как расплата за возможность проводить прогностические оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды в режиме реального времени. Если эти особенности учтены, то величина мощности дозы внешнего облучения от облака или факела выбросов радиоактивной примеси, содержащей  $N$  нуклидов, может быть представлена в виде формулы (21), в которой в качестве энергии фотонного излучения  $i$ -го нуклида используется  $\bar{E}_v$  из формулы (22).

$$D'_v(x_i, y_j, z_k) = 1,458 \cdot 10^3 \mu_a(\bar{E}_v) \bar{E}_v \eta_v \int_0^\infty dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_0^\infty q(x, y, z) [B(\bar{E}_v, R)/R^2] \exp(-\mu(\bar{E}_v)R) dz. \quad (23)$$

мЗв/час.

Поверхностное загрязнение подстилающей поверхности согласно работам [1,4] описывается уравнением:

$$d\chi/dt = \alpha(t)\beta(x, y)q(x, y, z, t) \Big|_{z=z_0} - \lambda\chi, \quad (24)$$

в котором первый член в правой части определяет скорость радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, второй – скорость распада радионуклидов;  $\beta(x, y)$  – скорость сухого осаждения. При длительности выброса  $t_d$ , начальной поверхностной активности  $\chi_0(x, y)$  и  $\alpha(t) = \frac{\sum_{i=1}^M Q_i}{\sum_{i=1}^N Q_i}$  – относительном весе радионуклидов радиоактивной примеси, определяющей загрязнение подстилающей поверхности, ( $M$  – количество радионуклидов, определяющих аэрозольную составляющую радиоактивной примеси,  $N$  – общее количество радионуклидов радиоактивной примеси, включающее и ИРГ,  $M \leq N$ );  $\lambda_s(t)$  – эффективной постоянной распада этой части примеси  $\lambda_s = 0,693/T_s(t)$ ;  $\bar{T}_s(t) = \frac{\sum_{i=1}^M T_i Q_i}{\sum_{i=1}^M Q_i}$ ,  $\bar{T}_s(t)$  – периоде полураспада радиоактивной примеси, осевшей на подстилающую поверхность, решение уравнения имеет вид:

$$\chi(x, y) = \beta(x, y) \int_0^{t_d} \alpha(t') q(x, y, z_0, t') \exp\left[-\int_{t'}^{t_d} \lambda_s(t'') dt''\right] dt' + \chi_0(x, y) \exp\left[-\int_{t'}^{t_d} \lambda_s(t') dt'\right]. \quad (25)$$

Если пренебречь вторичным переносом, то после выпадения радиоактивной примеси на подстилающую поверхность ее активность изменяется, в основном, за счет

радиоактивного распада. Поэтому через время  $\tau$  после прекращения процесса загрязнения радиоактивность подстилающей поверхности можно оценить по формуле:

$$\chi_n(x, y, \tau) = \chi(x, y) \exp[-\lambda_s(\tau)\tau], \quad (26)$$

в которой  $\chi(x, y)$  определено выражением (25).

Если радиоактивная примесь состоит из долгоживущих радионуклидов, формулы существенно упрощаются. Так величины  $\bar{E}_v, \bar{T}_v, \lambda_v, \alpha, \bar{E}_s, \bar{T}_s, \lambda_s$  можно считать постоянными, и вместо уравнения (25) получают:

$$\chi(x, y) = \alpha\beta(x, y) \exp(-\lambda_s\tau) \int_0^{t_d} q(x, y, z_0, t') \exp[-\lambda_s(t_d - t')] dt' + \chi_0(x, y) \exp[-\lambda_s(t_d + \tau)]. \quad (27)$$

Для поверхностной активности при стационарных условиях выброса получают следующее выражение:

$$\chi_s(x, y, \tau) = \alpha\beta(x, y) q(x, y, z) \Big|_{z=z_0} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_s\tau_d)}{\lambda_s} \exp(-\lambda_s\tau) + \chi_0(x, y) \exp[-\lambda_s(t_d + \tau)]. \quad (28)$$

Оценка величины объемной активности, измеряемой при использовании БДК, состоит в измерении величины мощности дозы фотонного излучения в точке наблюдения (расположении БДК)  $\gamma$ -датчиком и характеристик  $\gamma$ -излучения радионуклидов (энергии  $\gamma$ -излучения, амплитуды и ширины пика поглощения на полувысоте). Измерение объемной активности воздушного бассейна осуществляется по формуле (29), корректность которой требует равномерного распределения радиоактивной примеси в шаре радиусом  $R \approx 1/\mu$  ( $E_\gamma = 1$  МэВ):

$$q_R(x_0, y_0, z_0, E_i) = \frac{D'_R(x_0, y_0, z_0) \cdot p_i}{4\pi \cdot 1.458 \cdot 10^5 \sum_{i=1}^N \gamma(E_i) E_i \nu(E_i) \beta(E_i) p_i \left\{ \frac{(1 - \exp[-\mu_i R])}{\mu_i} + \frac{a_i \mu_i}{[\mu_i (b_i - 1)]^2} [1 - \exp(\mu_i R (b_i - 1))] + \frac{a_i R \cdot \exp[\mu_i R (b_i - 1)]}{(b_i - 1)} \right\}}, \quad (29)$$

где  $D'_R(x_0, y_0, z_0)$  – значение мощности дозы, регистрируемой  $\gamma$ -детектором;

$x, y, z$  – координаты точки наблюдения;

$E_i$  – энергия фотонов;

$\beta(E_i)$  – энергетическая чувствительность  $\gamma$ -детектора;

$\mu(E_i), \gamma(E_i)$  – коэффициенты линейного ослабления и передачи энергии фотонного излучения соответственно;

$\nu(E_i)$  – квантовый выход фотонов с энергией  $E_i$ ;

$p_i$  – парциальный (весовой) вклад активности  $i$ -го радионуклида в общую объемную активность;

$a_i, b_i$  – безразмерные параметры формулы Бергера, зависящие от энергии  $\gamma$ -излучения и описывающей фактор накопления в гомогенной бесконечной среде (воздухе);

$R$  – радиус сферы равный пробегу  $\gamma$ -кванта с энергией  $E_\gamma = 1,0$  МэВ в воздухе.

Иллюстрация метода приведена на рисунке 5.

Метод определения поверхностной активности радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности в следе радиоактивного облака, иллюстрация применения которого приведена на рисунке 6, не имеет принципиальных отличий от метода оценки объемной активности и также осуществляется БДК, но требует дополнительных технических средств, обеспечивающих измерения высоты сканирования, в виде лазерного дальномера, определения ее оптимальной величины и оценки эффективного

радиуса сканирования.



**Рис. 5.** – Иллюстрация к использованию БДК для измерения объемной активности радиоактивного облака, создаваемого радионуклидами, распространяющимися в воздушной среде по ветру

Эти вопросы были решены в работах [16,17], в которых было получено, что оптимальная высота сканирования составляет 60 м, а эффективная площадь сканирования определяется площадью круга, радиус которого определяется соотношением  $R_{эф} \approx mh_D$ , где  $h_D$  – высота сканирования (высота полета БДК);  $m$  – числовой параметр, устанавливающий связь между эффективным радиусом и высотой сканирования  $h_D$ . Величина поверхностной активности  $i$ -го радионуклида  $\chi(p_i)$  подстилающей поверхности, загрязненной радиоактивными аэрозолями, может быть вычислена по формуле (30), в которой  $m = 3$ .

$$\chi(p_i) = \frac{D'_{tot}(x_0, y_0, h_D) \cdot p_i}{2\pi \cdot 1,458 \cdot 10^5 \sum_{i=1}^N \gamma(E_i) E_i \nu(E_i) \beta(E_i) \psi(E_i) p_i \left\{ E_1(\mu(E_i) h_D) - E_1(\mu(E_i) h_D \sqrt{m^2 + 1}) + \frac{a_i}{1-b_i} \exp[\mu(E_i) h_D (b_i - 1) \sqrt{m^2 + 1}] \right\}}, \quad (30)$$

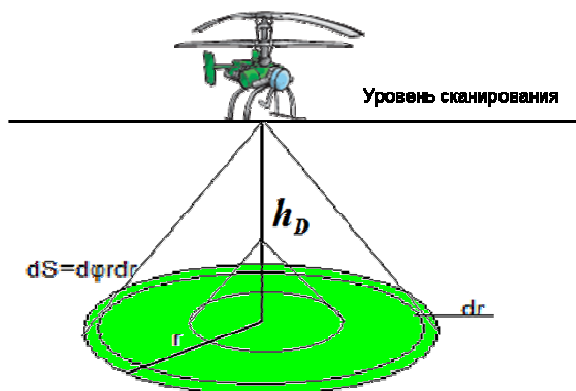
где  $D'_{tot}(x_0, y_0, h_D)$  – мощность дозы, создаваемая радиоактивными аэрозолями на подстилающей поверхности и измеряемая  $\gamma$ -детектором БДК;

$x_0, y_0$  – координаты точки наблюдения;

$E_1(\mu(E_i) h_D)$  – специальная функция;

$\psi(E_i)$  – поправочная функция, определяемая экспериментально [4];

$p_i$  – частичный вклад активности  $i$  – го радионуклида.



**Рис. 6.** – Иллюстрация к использованию БДК для измерения поверхностной активности подстилающей поверхности при ее радиоактивном загрязнении после прохождения радиоактивного облака.

$h_D$  – эффективная высота сканирования БДК

Из формул (29), (30) следует, что для оценки как объемной, так и поверхностной активности необходимы измерения мощности дозы  $\gamma$ -излучения, а также его спектрального состава. Для условий радиационных аварий необходимы  $\gamma$ -детекторы широкого диапазона от 0,01 мкЗв/час до  $10^2$  Зв/час. Для оценки спектрального состава целесообразно использовать спектрометрические датчики высокого разрешения, работающие в широком температурном диапазоне  $-30 - 180$  °С, к которым относятся ксеноновый  $\gamma$ -спектрометр (КГД) высокого давления [18]. К характеристикам  $\gamma$ -излучения, которые необходимо измерять  $\gamma$ -спектрометром относятся: энергия фотонов  $E_i$ , амплитуда пика поглощения  $A_i(E_i)$ , и его ширина на полувысоте  $\Delta E_i$ . Если эти характеристики измерены, то активность  $i$ -го радионуклида можно найти по формуле:

$$q_i = k \cdot \frac{\alpha(E_i)A(E_i)\Delta E_i}{\nu_i}, \quad (31)$$

где  $\alpha(E_i)$ ;  $\nu_i$  – квантовый выход фотонов с энергией  $E_i$ ;  
 $k$  – постоянная.

При этом величина суммарной активности от  $N$  радионуклидов определится выражением:

$$Q = \sum_{i=1}^N q_i = k \sum_{i=1}^N \frac{\alpha(E_i)A(E_i)\Delta(E_i)}{\nu_i}, \quad (32)$$

а вес радионуклида (вклад его парциальной активности в общую ее величину) – отношением:

$$p_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^N q_i} = \frac{\alpha(E_i)A(E_i)\Delta(E_i)/\nu_i}{\sum_{i=1}^N \frac{\alpha(E_i)A(E_i)\Delta(E_i)}{\nu_i}}. \quad (33)$$

Тогда, если известна величина общей активности радиоактивной примеси  $Q$ , то парциальную активность  $i$ -го радионуклида можно найти как  $q_i = p_i \cdot Q$ . Характерный спектр  $\gamma$ -излучения радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , регистрируемый КГД, приведен на рисунке 7.

Применение численных или аналитических методов, позволяющих решить задачу переноса радиоактивной примеси в атмосфере вида (13)-(20) или, имеющих более сложный вид [13], дает возможность получить численные оценки дозовой нагрузки на персонал и население вида (21), (23), а также рассчитать характер поверхностного радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, используя решения (25)-(28), для тех или иных условий. Однако, точность такого рода оценок, как указывалось выше, может быть не высока, но их преимущество состоит в том, что эти оценки можно получить в любой точке из области определения функции переноса радиоактивной примеси в атмосфере. Поэтому, чтобы исключить этот досадный недостаток, целесообразно использовать результаты измерений либо подобных величин, предоставляемых либо  $\gamma$ -датчиками системы АСКРО, либо БДК, либо их усредненные характеристики. Для этого следует провести измерение той или иной величины, например, мощности дозы внешнего облучения от объемного источника или от подстилающей поверхности в выбранной точке с заданными координатами и получить численную оценку этой же величины в выбранной точке, затем сравнить данные, найти

поправочный коэффициент, умножая который на расчетные данные, получить, наконец, результаты в любой точке из области определения функции с погрешностью не выше погрешности приборов измерения.

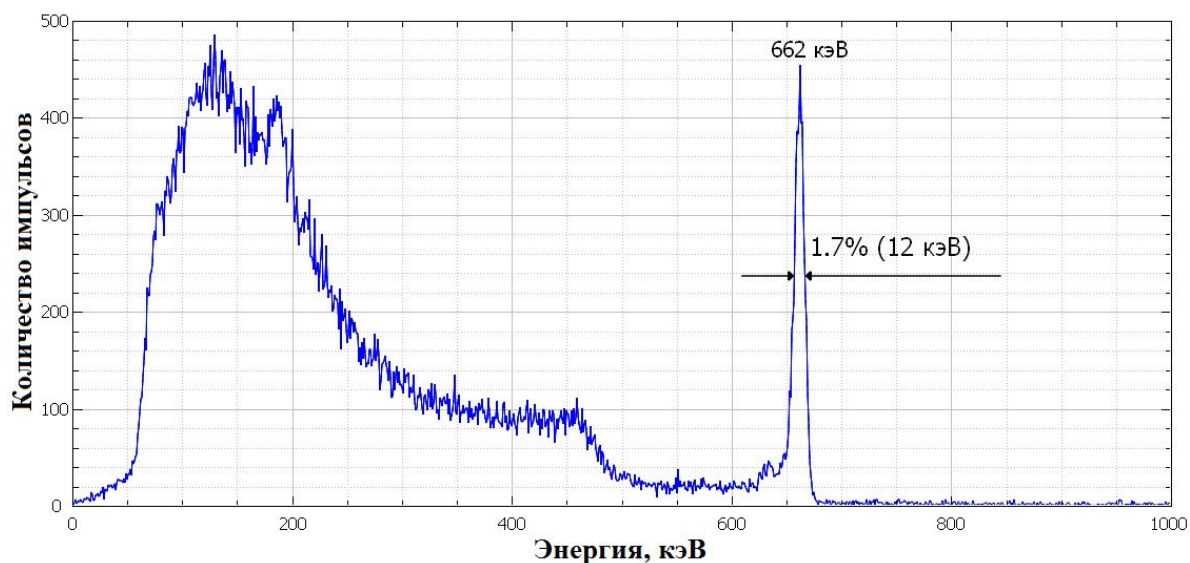


Рис. 7. – Спектр  $\gamma$ -излучения радионуклида <sup>137</sup>Cs, регистрируемого КГД, полученный методом цифровой обработки сигналов [18]

Приведенный метод оценки мощностей доз внешнего облучения от объемного источника или подстилающей поверхности справедлив, если измерения или численные оценки указанных величин проводят вблизи источника или на значительном расстоянии от него, где радиоактивная примесь распределена в пространстве далеко не равномерно. Если же расстояние от источника таково, что выполняется условие лучевого равновесия, то оценка дозовых нагрузок фотонного излучения может быть получена значительно проще, используя концепцию лучевого равновесия, в рамках которой указанные оценки для различных радионуклидов могут быть найдены по формулам [19]:

$$H_{\text{экв}} = A_V B_{\alpha\gamma} t, \tag{34}$$

где  $H$  – эквивалентная доза;

$A_V$  – объемная активность радиоактивной примеси, [Бк/м<sup>3</sup>];

$B_{\alpha\gamma}$  – дозовый коэффициент, равный мощности эквивалентной дозы, создаваемой в ткани человека на открытой поверхности почвы при единичной концентрации радионуклида в атмосферном воздухе, [Зв·м<sup>3</sup>/(с·Бк)];

$t$  – время облучения, с.

– доза при ингаляции:

$$H_{\text{инг}} = A_V B_a t, \tag{35}$$

где  $B_a$  – дозовый коэффициент, численно равный мощности эквивалентной дозы для определенного органа человека, создаваемой при единичной концентрации радионуклида во вдыхаемом воздухе (обычно применяется для условного человека), Зв·м<sup>3</sup>/(с·Бк).

– доза, получаемая пероральным путем:



$$H_{\text{пер}} = A_V B_g t, \quad (36)$$

где  $B_g$  – дозовый коэффициент, численно равный мощности эквивалентной дозы для определенного органа человека, создаваемой при единичной концентрации радионуклида, при заглатывании.

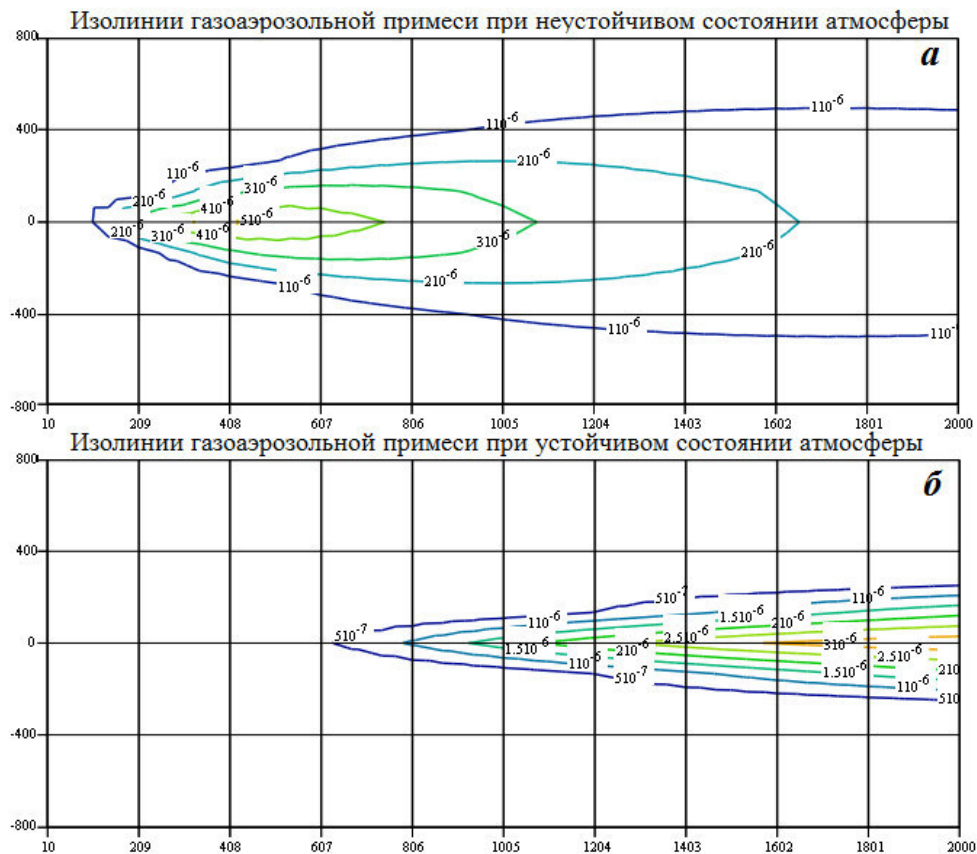
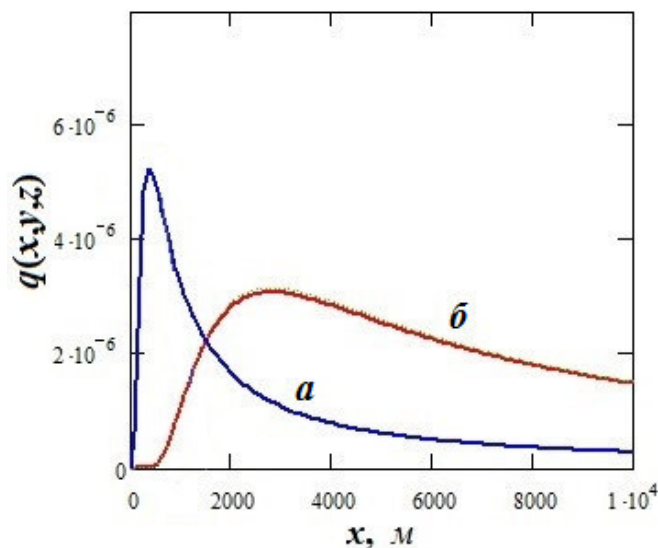


Рис. 8. – Уровни поверхностного загрязнения подстилающей поверхности для неустойчивого состояния атмосферы (а) и устойчивого (б). Расчет по формуле (13) при  $z = 1,5$  м

В заключение этого краткого обзора методов и средств радиационного контроля окружающей среды приведем (см. рис. 8) результаты расчетов загрязнения подстилающей поверхности в зависимости от состояния устойчивости приземного слоя атмосферы, определяемой системой уравнений (1) – (12), при найденных масштабах Мони́на-Обухова  $L$  и динамической скорости  $v_*$ , указанных на рисунках 2, 3. На рисунке 8 приведены результаты расчетов изолиний пространственного распределения радиоактивной примеси в приземном слое атмосферы (на высоте  $z = 1,5$  м), которое описывается системой уравнений (13) – (20). Эти расчеты наглядно показывают какую важную роль может играть состояние устойчивости атмосферы при оценке площади радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности и ущерба населенным пунктам, сельскохозяйственным угодьям и экологии окружающей среде в целом. На рисунке 9а, б, в рамках рассматриваемой задачи, приведены результаты расчета осевого распределения радиоактивной примеси для неустойчивого (а) и устойчивого (б) состояний атмосферы, соответствующих рисункам 8а и 8б. Из анализа характера осевого распределения объемной активности, приведенного на рисунке 9, следует, что уровни одного значения поверхностного загрязнения, начиная с самого низкого, приведенные на рисунках 8а и 8б, в зависимости от состояния устойчивости атмосферы будут начинаться на различных расстояниях от начала координат.





**Рис. 9.** – Осевые распределения выбросов объемной активности  $q(x,y=0,z=1,5)$  газоаэрозольной радиоактивной примеси при *неустойчивом* (а) и *устойчивом* (б) состояниях атмосферы. Расчет по формуле (13) при  $z = 1,5$  м

Полученная информация об уровнях радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население в условиях радиационной аварии на ОИАЭ должна быть проанализирована в соответствии с критериями, которые определены нормативными документами: НРБ-99/2009, СП АС-2003, ОСПОРБ-99/2010 и др. Выполнение требований этих документов определяет «План Мероприятий», согласно которому на ОИАЭ в условиях радиационной аварии по согласованному с руководством ОИАЭ сценарию осуществляются определенные действия, направленные на минимизацию последствий аварии, порядок, последовательность и обязательность их выполнения, что, в конечном итоге, и позволит минимизировать последствия радиационной аварии. Результат указанных последовательных действий в рамках «Плана Мероприятий» будет играть существенную роль, как при минимизации последствий радиационной аварии, так и при оценке ущерба окружающей среде и населению.

Ликвидация радиационной аварии начинается с возобновлением управления источником, после чего ставится задача минимизации последствий аварии.

При решении последней задачи руководствуются информацией, касающейся радионуклидного состава выброса, его длительности, особенности подстилающей поверхности, попавшей в зону радиоактивного загрязнения, её площадью, численностью населения, проживающего в этой зоне. Для принятия решений о действиях, связанных с населением, руководствуются типом радионуклидов ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), периодом полураспада (короткоживущие, долгоживущие) и возможными дозовыми нагрузками на население, которое оно может получить, находясь на загрязненной территории.

При радиоактивном загрязнении короткоживущими радионуклидами следует проводить выжидательную тактику, то есть ограничить перемещение населения по территории на время распада радионуклидов до приемлемого уровня, организовать подвоз чистой воды и продуктов первой необходимости.

При загрязнении территории долгоживущими радионуклидами, методика принимает более сложный вид. В совокупности с дозовыми нагрузками на население, выбирается тип методики. Эти нагрузки закреплены законодательно и представлены в

таблицах 1 и 2 [20].

**Таблица 1.** – Критерии для принятия решений об отселении и ограничении потребления загрязненных пищевых продуктов [20]

<i>Меры защиты</i>	<i>Предотвращаемая эффективная доза, мЗв</i>	
	<i>уровень А</i>	<i>уровень Б</i>
Ограничение потребления загрязненных продуктов питания и питьевой воды	5 за первый год 1 /год в последующие годы	50 за первый год 10 /год в последующие годы
Отселение	50 за первый год	500 за первый год
	1000 за все время отселения	

**Таблица 2.** – Критерии для принятия решений об ограничении потребления загрязненных продуктов питания в первый год после возникновения аварии [20]

<i>Радионуклиды</i>	<i>Удельная активность радионуклида в пищевых продуктах, кБк/кг</i>	
	<i>уровень А</i>	<i>уровень Б</i>
<sup>131</sup> I, <sup>134</sup> Cs, <sup>137</sup> Cs	1	10
<sup>90</sup> Sr	0,1	1,0
<sup>238</sup> Pu, <sup>239</sup> Pu, <sup>241</sup> Am	0,01	0,1

**Таблица 3.** – Критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии [20]

<i>Меры защиты</i>	<i>Предотвращаемая доза за первые 10 суток, мГр</i>			
	<i>на все тело</i>		<i>щитовидная железа, легкие, кожа</i>	
	<i>уровень А</i>	<i>уровень Б</i>	<i>уровень А</i>	<i>уровень Б</i>
Укрытие	5	50	50	500
Йодная профилактика: взрослые	-	-	250*	2500*
дети	-	-	100*	1000*
Эвакуация	50	500	500	5000
* Только для щитовидной железы				

Принятие решений о мерах защиты населения в случае запроектной радиационной аварии с радиоактивным загрязнением территории проводится на основании сравнения прогнозируемой дозы, предотвращаемой защитным мероприятием, и уровней загрязнения с уровнями А и Б, приведенными в таблицах 1, 2. Критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии, представлены в таблице 3.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, не превосходит уровень А, нет необходимости в выполнении мер защиты, связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории.

Если предотвращаемое защитным мероприятием облучение превосходит уровень А, но не достигает уровня Б, решение о выполнении мер защиты принимается по принципам обоснования и оптимизации с учетом конкретной обстановки и местных условий.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, достигает и превосходит уровень Б, необходимо выполнение соответствующих мер защиты, даже если они связаны с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории.

На поздних стадиях радиационной аварии, повлекшей за собой загрязнение обширных территорий долгоживущими радионуклидами, решения о защитных мероприятиях принимаются с учетом сложившейся радиационной обстановки и конкретных социально-экономических условий.

В зависимости от типа загрязненной территории выбирается одна из методик

оценки последствий аварии и набора мероприятий по ликвидации ее последствий [20]. Методика содержит в себе критерии и рекомендации для экстренных служб по работе в зоне аварии с объектами природы и инфраструктуры, а так же населением.

Территории, которые могут быть загрязнены в результате прохождения над ними радиоактивного облака при гипотетической аварии, целесообразно разделить на три типа: населенные пункты; сельскохозяйственные угодья; парки, заповедники, естественные природные заказники.

Для первого типа большое значение имеет такое мероприятие, как рекультивация и дезактивация земель (почва, инфраструктура). При этом для определения вида радионуклидов, загрязняющих подстилающую поверхность, предварительно проводится спектральный анализ проб подстилающей поверхности, используя методы, основанные на применении либо БДК (9), либо мобильной лаборатории дозиметрического контроля (7) (см. рис. 1). Исходя из результатов, принимается решение о выполнении тех или иных мероприятий: при дозовых нагрузках на население больше 30 мЗв в месяц для начала временного отселения и 10 мЗв в месяц для окончания временного отселения. Если прогнозируется, что накопленная за один месяц доза будет находиться выше указанных уровней в течение года, тогда решается вопрос о полной эвакуации населения [20]; дезактивация гражданских, природных, военных и промышленных объектов; эвакуация населения на время проведения мероприятий по ликвидации последствий аварии с предоставлением медицинских услуг. Информационные мероприятия следует проводить путем издания брошюр для населения близлежащих населенных пунктов с описанием правил поведения и актуальных сведений об обстановке на загрязненной территории. Для более оперативного извещения населения близлежащих городов рекомендуется создание информационных центров, установка табло с отображаемой на нем актуальной информацией о радиационной обстановке.

Для второго и третьего типов радиоактивно-загрязненных территорий целесообразно рассматривать вопрос о физических мерах их изоляции. Такими средствами могут служить ограждения строительного типа из полупрозрачных конструкций, с созданием КПП и постов охраны [21]. При создании таких систем следует учитывать биоценоз местности, поскольку существование ограждений ставит под угрозу пути миграции, а также условия обитания крупных животных, ареал обитания которых может располагаться на изолируемых территориях. Поэтому эти вопросы следует учитывать, устанавливая для животных коридоры проходов, аналогичных тем, что создаются при строительстве автомобильных трасс. Для всех трех типов методик необходимо производить оценку дозовых нагрузок специальными службами, с использованием специализированной техники и приборов (5),(6), указанных выше (см. рис. 1), а также средств индивидуальной защиты персонала. Для оперативного анализа, как уже указывалось, целесообразно использование на ОИАЭ передвижных мобильных лабораторий (7) для исследования проб почвы и воды из зоны загрязнения [10], а также беспилотных средств радиационного контроля воздушной среды и водных акваторий (8),(9), о чем упоминалось выше.

Таким образом, общий вид методики оценки ущерба последствий радиационной аварии и последовательности шагов их ликвидации можно изобразить в виде схемы (рис. 10).

#### ДИСПАНСЕРИЗАЦИЯ ВЗРОСЛОГО НАСЕЛЕНИЯ, ПОСТРАДАВШЕГО ВО ВРЕМЯ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ

Диспансеризация представляет собой комплекс мероприятий, в том числе по проведению медицинских осмотров врачами разной направленности и применение необходимых методов обследования.



**Рис. 10.** – Блок–схема методики оценки ущерба последствий радиационной аварии и последовательности шагов их ликвидации

В соответствии с Порядком проведения диспансеризации определенных групп взрослого населения, утвержденным Приказом Минздрава РФ от 03.12.2012 № 1006н (далее – Порядок № 1006н):

– первый этап диспансеризации включает в себя осмотр врачами-специалистами, исследования и иные мероприятия, проводимые у мужчин и женщин в определенный возрастной период;

– второй этап включает индивидуальное дообследование и уточнение диагноза заболевания, проведение углубленных профилактических консультаций.

Оплата первого этапа диспансеризации производится по законченному случаю. Расчет стоимости первого этапа необходимо осуществлять с учетом дифференциации в зависимости от объема диспансеризации по полу и возрасту, установленного Порядком № 1006н.

Оплата второго этапа диспансеризации осуществляется за посещение или законченный случай, включая посещения к конкретным специалистам (с учетом объема исследований по направлениям данных специалистов).

Оплата услуг в рамках мероприятий по диспансеризации, оказываемых учреждением гражданам, производится по тарифам. Тарифы для первого и второго этапов диспансеризации устанавливаются тарифным соглашением в субъекте РФ (см. табл. 4).

**Таблица 4.** – Тарифы на оплату медицинской помощи [22], [23].

Наименование услуги	Стоимость программы на одного человека (в руб.)
Диспансеризация для мужчин до 40 лет	11 450
Диспансеризация для мужчин старше 40 лет	12 300
Диспансеризация для женщин до 40 лет	14 450

Диспансеризация для женщин старше 40 лет	16 600
--	--------

В соответствии со статьей 5 закона 1244-1, статьей 15 закона 175-ФЗ, статьей 4.1 закона 2-ФЗ, такие денежные компенсации, за некоторым исключением, индексируются каждый год. Например, коэффициент индексации – с 1 февраля 2016 года – 1,07 [24].

Размер компенсации носит сугубо индивидуальный характер, который зависит от нанесенного материального и физического ущерба во время и после аварии. На примере аварии на ЧАЭС можно увидеть, что перечень медицинских и социальных услуг, а так же их стоимость, определены законодательно [24].

При аварии, повлекшей за собой радиоактивное загрязнение обширной территории, на основании контроля и прогноза радиационной обстановки устанавливается зона радиационной аварии. В зоне радиационной аварии проводится контроль радиационной обстановки и осуществляются мероприятия по снижению уровней облучения населения на основе изложенных в [20] принципов и подходов.

### ПОРАЖЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА В ЗОНЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ

На примере аварии на ЧАЭС можно судить о поведении загрязнителя в момент выброса, а так же непосредственно после аварии.

В результате первичных работ, необходимых для проведения дезактивирующих мероприятий (частичное снятие загрязненного поверхностного слоя грунта около аварийного блока, покрытие площадки бетонными плитами и засыпание чистыми материалами – песком, щебнем и т.п.), возникает сложная последовательность почвенных слоев. Краткая характеристика таких слоев указана в таблице 5.

**Таблица 5.** – Характеристики геологической модели разреза локальной зоны «Укрытия» (указаны первые 4 зоны)

№ зоны	Геологический разрез			
	Зоны, выделенные по:		Литологический состав зон	
	физико-химическим условиям	стратиграфическим условиям		
I	Зона аэрации		Послеаварийный	Щебень, гравий, бетон, сухая
			техногенный слой	бетонная смесь, шлак, песок
II	Зона аэрации		Активный слой	Почвенно-растительный слой, песок, бетон
III			Доаварийный техногенный слой	Строительный мусор, песок, супесь
IV	Зона насыщения	Колебания УГВ	Естественные отложения	Пески различной зернистости, супесь, суглинок, фрагменты строительных конструкций

Радиометрический и радиохимический анализы проб показал, что толщина «активного» слоя составляет 10÷20 см) (см. рис. 11).

Таким образом, можно определить слой грунта, необходимый для снятия и последующей утилизации – 10-20 см., в зависимости от расположения местности и объема осадения осадков [25].

Примерная сметная стоимость строительных и монтажных работ определена в соответствии с [26] с последующим пересчетом в уровень цен 2016 года (т.р.):

- оплата труда рабочих-строителей – 29,113;
- эксплуатация строительных машин и механизмов – 15,653;
- материалы – 9,894.

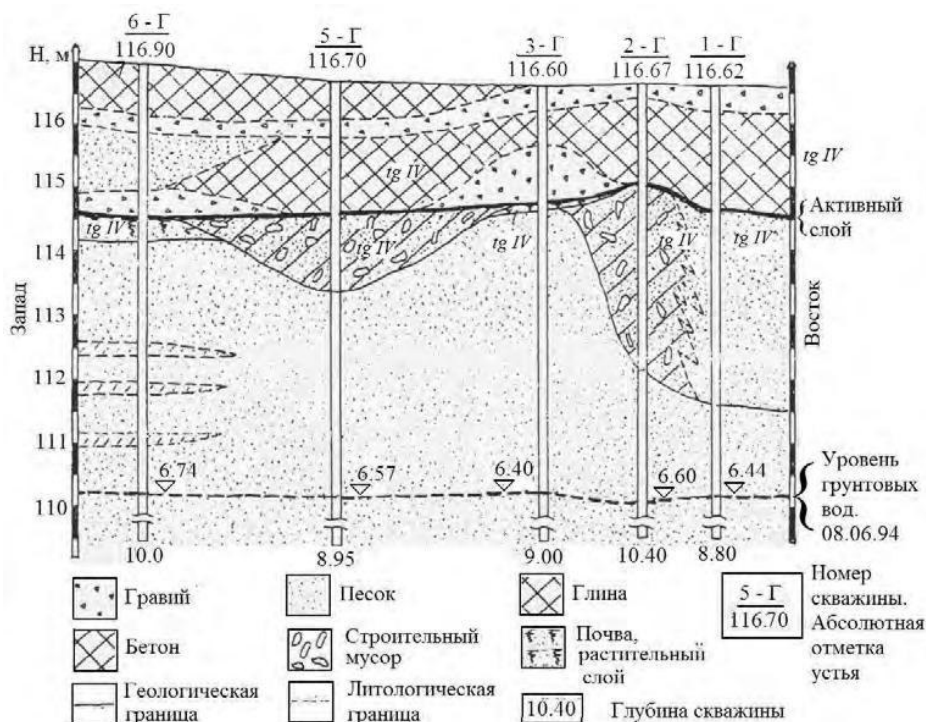


Рис. 11. – Геолого-литологический разрез (упрощенный). Масштаб горизонтальной шкалы – 1:100, масштаб вертикальной шкалы – 1:50. Уровень грунтовых вод – максимальный в 1994 г. (8 июня)

Допустим, при радиационной аварии произошло загрязнение почвенного и растительного покрова на площади 105,89 га.

Общая площадь проведения работ по рекультивации нарушенных земель составляет 32,08 га, стоимость выполнения работ технического этапа рекультивации в ценах 2014 г. – 3 391,911 тыс. руб., стоимость выполнения работ биологического этапа в ценах за 2014 г. [27, 28] – 6 141,574 тыс. руб.

Суммарная стоимость выполнения технического и биологического этапов работ по рекультивации земель составляет 9 533,485 тыс. руб.

### НОРМАТИВЫ ЖИЛИЩНОЙ ПЛОЩАДИ И ЕЕ СТОИМОСТЬ

При эвакуации населения из зоны радиационной аварии, перед государством стоит вопрос о его постоянном размещении. Наиболее оптимальный вариант – расселение по новым квартирам, как это было сделано после аварии на ЧАЭС.

Санитарная норма жилищной площади составляет минимум 6 квадратных метров на одного человека, высота помещения должна быть не ниже 2,2 метра. Согласно [29], норма жилищной площади – 12 квадратных метров на одного жильца. На территории РФ гражданам выделяется площадь в помещениях от 9 до 12 кв.м при высоте потолке от двух с половиной до трех метров.

Стоимость одного квадратного метра жилья различается [30], в зависимости от федерального округа и района размещения. На 2016 год цены варьируются от 25160 р. (республика Калмыкия) до 90400 р. (г. Москва). Однако, с точки зрения статистики, цены в Москве являются выбросом, поэтому среднюю стоимость кв.м. жилья можно принять за 33 тысячи рублей.

Средняя двухкомнатная квартира имеет метраж в 52 кв.м. Итак, стоимость размещения семьи в двухкомнатной квартире – 1 716 000 р. На этом примере можно

провести расчет стоимости расселения населения для его разных слоев. Стоимость размещения одной семьи умножается на количество семей (квартир).

До аварии на ЧАЭС в г. Припять население составляло 47,5 тыс. чел. (на ноябрь 1985 г.). Полагая, что средняя семья состоит из 4 человек (мать, отец и двое детей), при эвакуации 12 000 семей потребуется не меньшее количество квартир, что эквивалентно 20,4 млрд. руб. При этом, амбулаторное медицинское обслуживание населения, оказавшегося в зоне радиоактивного загрязнения, рекультивация земель, а также работы по животноводческому комплексу, несомненно, увеличат статью затрат. Напротив, затраты на систему АСКРО, оснащенную оборудованием, указанным на рисунке 1, с числом постов ~ 20 составляют 25-40 млн. руб.

Приведенные оценки убедительно показывают, что материальные и финансовые затраты на оборудование АЭС, позволяющее осуществлять радиационный контроль, проводить его обслуживание, а также вести работы, связанные с прогностическими оценками радиоактивного загрязнения окружающей среды, будут обходиться значительно дешевле, чем материальные и финансовые затраты по ликвидации последствий аварии на ОИАЭ.

Таким образом, представленные материалы с достаточной убедительностью дают полную картину методов оценки ущерба, связанного с радиационной аварией на ОИАЭ, содержащую как методы радиационного контроля, включающие методы и средства определения радионуклидного состава радиоактивной примеси, распространяющейся в окружающей среде, так и аппарат прогнозирования радиоактивного загрязнения окружающей среды и методы ликвидации последствий радиационных аварий. Несомненно, что математическая модель переноса радиоактивной примеси в атмосфере, используемая для целей прогнозирования и оценок радиоактивного загрязнения окружающей среды, может быть любой из рекомендованных Ростехнадзором [13] (наиболее адаптированной к местным условиям), но, что в любом случае необходимо, так это обязательное использование гибридного мониторинга, т.е. сочетание расчетных методов прогнозирования с привлечением результатов измерений дозовых характеристик ионизирующего излучения детекторами АСКРО [1, 4]. Последнее существенно повысит точность прогностических оценок, что, в конечном итоге, уменьшит материальные и финансовые затраты на ликвидацию последствий радиационной аварии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елохин, А.П.* Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А. П. Елохин : учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 316 с.
2. *Легасов, В.А. и др.* Водородная энергетика // Атомно-водородная энергетика и технология [Текст] / В.А. Легасов и др. – Вып. 1. – М., 1978. – С. 11–36.
3. *Шпильрайн, Э.Э. и др.* Введение в водородную энергетику [Текст] / Э.Э. Шпильрайн, С.П. Малышенко, Г.Г. Кулешов. Под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.
4. *Елохин, А.П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды [Текст] : монография / А.П. Елохин; М-во образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
5. *Крышев, И.И. и др.* Оценка ущерба окружающей среде при использовании атомной энергии [Текст] / И.И. Крышев, Л.А. Курындина, И.И. Линге // Атомная энергия. – 2014. – Том 117. – Вып. 3. – С. 159–163.
6. *Лайхтман, Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы [Текст] / Д.Л. Лайхтман. – Л.: Гидромет. изд-во, 1970. – 340 с.
7. *Стародубцев, И.А. и др.* К вопросу об использовании автоматизированных систем контроля экологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям черной, цветной металлургической и атомной промышленности [Текст] / И.А. Стародубцев, А.П. Елохин // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №4(17). – С. 15–34.

8. *Талерко, Н.Н. и др.* К расчету траекторий струй в приземном слое атмосферы [Текст] / Н.Н. Талерко, М.В. Буйков // Труды УкрНИГМИ. – 1979. – Вып. 170. – С. 90–96.
9. *Дмитриев, А.В. и др.* Методы экспериментального определения параметров шероховатости почвенного покрова [Текст] / А.В. Дмитриев, В.В. Дмитриев, И.С. Коньшев, В.Н. Тудос // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 5(51). – С. 104–106.
10. Мобильная лаборатория радиационного контроля "Мультирад ЭКО" [Электронный ресурс] // Информационный портал о контрольно-измерительных приборах и их производителях [pribory-si.ru](http://pribory-si.ru) – Каталог средств измерений, испытательного и лабораторного оборудования – 2016. – Режим доступа: URL: <http://pribory-si.ru/catalog/4602/5219/> - 09.03.2016.
11. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-2003/2010). СП 2.6.1.27-2000 [Текст].
12. *Елохин, А.П.* Оптимизация методов и средств автоматизированных систем контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А.П. Елохин: дисс. докт. техн. наук. – М.: МИФИ, 2001. – 325 с.
13. *Елохин, А.П. и др.* Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РБ – 053 – 09 [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, Е.А. Иванов. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.06.2010 г. № 465. – 79 с.
14. Метеорология и атомная энергия [Текст] / Пер. с англ. Под ред. Н.Л. Бызовой, К.П. Махонько. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 648 с.
15. *Машкович, В.П. и др.* Защита от ионизирующих излучений [Текст] / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
16. *Елохин, А.П. и др.* Способ дистанционного измерения загрязнения радионуклидами подстилающей поверхности в следе радиоактивного выброса радиационно-опасных предприятий и система для его осуществления [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, П.А. Пархома. Патент №2388018, бюл. №12, от 27.04.2010. Приор. от 26.06.2009.
17. *Елохин, А.П. и др.* Особенности сканирования подстилающей поверхности при помощи беспилотного дозиметрического комплекса [Текст] / А.П. Елохин, Жилина М.В., Пархома П.А. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – Вып. 2. – С. 103–112.
18. *Улин, С.Е. и др.* Перспективы использования ксенонового гамма-спектрометров для экологического мониторинга [Текст] / С.Е. Улин, В.В. Дмитренко, В.М. Грачев, З.М. Утешев, К.Ф. Власик, А.С. Новиков // IV Международная конференция-выставка «Экологические системы, приборы и чистые технологии», Москва, 10-22 апреля 2010. – 2010. – №7. – С. 3–10.
19. *Гусев, Н.Г. и др.* Радиоактивные выбросы в биосфере [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
20. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) [Текст].
21. *Бондарев, П.В. и др.* Физическая защита ядерных объектов : учебное пособие для вузов [Текст] / П.В. Бондарев, А.В. Измайлов, А.И. Толстой; Под ред. Н.С. Погожина. – М.: МИФИ, 2008. – 584 с.: илл.
22. Постановление Правительства РФ от 4 октября 2012 г. №1006 «Об утверждении Правил предоставления медицинскими организациями платных медицинских услуг» [Текст]. – 2012.
23. Федеральный закон Российской Федерации от 21.11.2011 (ред. 25.11.2013) г. №323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» [Текст]. – 2013.
24. Закон РФ от 15 мая 1991 г. №1244-1 «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» [Текст] – 1991.
25. *Боровой, А.А. и др.* Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие») [Текст] / А.А. Боровой, Е.П. Велихов. Часть 3. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013. – 156 с.
26. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации МДС 81-35.2004 [Текст]. – 2004.
27. *Пинаев, В.Е. и др.* Вопросы рекультивации земель – опыт подготовки главы для Проекта мероприятий по охране окружающей среды [Электронный ресурс] / В.Е. Пинаев, Д.В. Касимов, О.О. Афанасьева // Мир науки : интернет-журнал. – 2015 – №1. – Режим доступа: URL: <http://mirnauki.com/PDF/13EMN115.pdf> - 10.06.2016.
28. *Пинаев, В.Е. и др.* Оценка воздействия на почвенно-растительный покров – практика проведения при ОВОС [Электронный ресурс] / В.Е. Пинаев, Д.В. Касимов Науковедение : интернет-журнал (учредитель журнала НОУ ВПО ИГУПИТ). № 6 (24), выпуск ноябрь-



- декабрь 2014. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/121EVN614.pdf>.
29. Жилищный кодекс Российской Федерации. Статья 38. [Текст].
30. О нормативе стоимости одного квадратного метра общей площади жилого помещения по Российской Федерации на первое полугодие 2016 года и показателях средней рыночной стоимости одного квадратного метра общей площади жилого помещения по субъектам Российской Федерации на I квартал 2016 года. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 28 декабря 2015 г. №951/пр. г. Москва. – М, 2015.

## REFERENCES

- [1] Elohin A.P. Avtomatizirovannye sistemy kontrolja radiacionnoj obstanovki okruzhajushhej sredy [The automated control systems of environment radiation situation]: uchebnoe posobie [education guidance]. M. Pub. NIJaU MIFI [NRNU MePhI], 2012, ISBN 978-5-7262-1716-1, 316 p. (in Russian)
- [2] Legasov V.A. etc. Vodorodnaja jenergetika [Hydrogen power engineering]. Iz knigi «Atomno-vodorodnaja jenergetika i tehnologija» [in “Atomic and hydrogen power and technology” book]. M. 1978, pp. 11–36. (in Russian)
- [3] Shpilrajn Je.Je., Malysenko S.P., Kuleshov G.G. Vvedenie v vodorodnuju jenergetiku. Pod redakciej V.A. Legasova [Introduction to hydrogen power]. M. Pub. Jenergoatomizdat [Energoatomizdat], 1984, 264 p. (in Russian)
- [4] Elohin A.P. Metody i sredstva sistem radiacionnogo kontrolja okruzhajushhej sredy : monografija [Methods and means of systems of environment radiation control: monograph]. M. Pub. NIJaU MIFI [NRNU MePhI], 2014, ISBN 978-5-7262-1957, 520 p. (in Russian)
- [5] Kryshev I.I., Kuryndina L.A., Linge I.I. Ocenka ushherba okruzhajushhej srede pri ispolzovanii atomnoj jenerгии [Assessment of damage to the environment when using atomic energy]. Atomnaja jenerгija [Atomic energy]. 2014, Vol. 117, №3, ISSN 0004-7163, pp. 159–163. (in Russian)
- [6] Lajhtman D.L. Fizika pograničnogo sloja atmosfery [Physics of an interface of the atmosphere]. Leningrad. Pub. Gidromet [Gidromet], 1970, 340 p.
- [7] Starodubcev I.A., Elohin A.P. K voprosu ob ispolzovanii avtomatizirovannyh sistem kontrolja jekologičeskoj obstanovki na territorijah, privilegajushhih k predpriyatijam chernoj, cvetnoj metallurgičeskoj i atomnoj promyshlennosti [Use of Automated Systems for Environmental Monitoring in the Area Surrounding Ferrous, Nonferrous Metallurgical Enterprises and Nuclear Industry]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2015, №4(17), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 15–34. (in Russian)
- [8] Talerko N.N., Bujkov M.V. K raschetu traektorij struj v prizemnom sloe atmosfery [To calculation of streams trajectories in a ground layer of the atmosphere]. Trudy UkrNIGMI [Works of Ukrainian research hydrometeorological institute], 1979, Vol.170, pp. 90–96. (in Russian)
- [9] Dmitriev A.V., Dmitriev V.V., Konyshov I.S., Tudos V.N. Metody jeksperimentalnogo opredelenija parametrov sherohovatosti pochvennogo pokrova [Methods of experimental determination of soil cover roughness parameters]. Vestnik SibGAU [Siberian State Aerospace University bulletin], 2013, №5(51), ISSN 1816-9724, pp. 104–106. (in Russian)
- [10] Mobilnaja laboratorija radiacionnogo kontrolja "Multirad JeKO". Informacionnyj portal o kontrolno-izmeritel'nyh priborah i ih proizvoditeljah pribory-si.ru. Katalog sredstv izmerenij, ispytatel'nogo i laboratornogo oborudovanija [Mobile laboratory of radiation control "Multirad EKO" / the Information portal about instrumentations and their pribory-si.ru producers - Catalog of measuring instruments, test and laboratory equipment], 2016. Available at: <http://pribory-si.ru/catalog/4602/5219/> (in Russian)
- [11] Sanitarnye pravila proektirovanija i jekspluatacii atomnyh stancij (SP AS-2003/2010). SP 2.6.1.27-2000 [Health regulations of design and operation of nuclear power plants.]. (in Russian)
- [12] Elohin A.P. Optimizacija metodov i sredstv avtomatizirovannyh sistem kontrolja radiacionnoj obstanovki okruzhajushhej sredy [Optimization of methods and means of the automated control systems of environment radiation situation.]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehničeskih nauk [The thesis for the Doctor of Engineering degree]. M. MIFI [MEPhI], 2001, 325 p. (in Russian)
- [13] Elohin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Ivanov E.A. Polozhenie o povyshenii točnosti prognostičeskih ocenok radiacionnyh harakteristik radioaktivnogo zagrjaznenija okruzhajushhej sredy i dozovyh nagruzok na personal i naselenie. Prikaz Federalnoj sluzhby po jekologičeskomu, tehničeskomu i atomnomu nadzoru ot 08.06.2010 goda [Provision on increase in accuracy of predictive estimates of radiation characteristics of radioactive environmental pollution and dose

- loads of personnel and population. The Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation, Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of RB – 053 – 09. Approved by the order of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, 08.06.2010.]. №465, 79 p. (in Russian)
- [14] Meteorologija i atomnaja jenergija [Meteorology and atomic energy]. Pod redakciej N.L. Byzovoj, K.P. Mahonko [Edited by]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1971, 648 p. (in Russian)
- [15] Mashkovich V.P., Kudrjavceva A.V. Zashhita ot ionizirujushhix izluchenij : spravochnik [Protection against ionizing radiation]. M. Pub. Jenergoatomizdat [Energoatomizdat], 1995. ISBN 5-283-03059-8, 496 p. (in Russian)
- [16] Elohin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Parhoma P.A. Sposob distancionnogo izmerenija zagraznenija radionuklidami podstilajushhej poverhnosti v slede radioaktivnogo vybrosa radiacionno-opasnyh predpriyatij i sistema dlja ego osushhestvlenija. Patent № 2388018, bjuleten №12, 27.04.2010 [Way of remote measurement of pollution by radionuclides of the spreading surface in a trace of radioactive emission of the radiation-hazardous enterprises and system for his implementation. The patent № 2388018, the bulletin № 12, 4/27/2010.]. (in Russian)
- [17] Elohin A.P., Zhilina M.V., Parhoma P.A. Osobennosti skanirovanija podstilajushhej poverhnosti pri pomoshhi bespilotnogo dozimetricheskogo kompleksa [Features of scanning of the spreading surface by means of a pilotless dosimetric complex]. Atomnaja jenergija [Atomic energy], 2009, Vol. 107, №2, ISSN 0004-7163, pp 103–112. (in Russian)
- [18] Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Grachev V.M., Uteshev Z.M., Vlasik K.F., Novikov A.S. Perspektivy ispolzovanija ksenonovogo gamma-spektrometrov dlja jekologicheskogo monitoringa. IV Mezhdunarodnaja konferencija-vystavka «Jekologicheskie sistemy, pribory i chistye tehnologii», 10-22 aprelja 2010 goda [Prospects use xenon gamma spectrometers for environmental monitoring. IV International conference exhibition "Ecological Systems, Devices and Clean Technologies", Moscow, on April 10-22, 2010]. M. 2010, №7, pp. 3–10. (in Russian)
- [19] Gusev N.G., Beljaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere [Radioactive emissions in the biosphere]: spravochnik [Reference book]. M. Pub. Jenergoatomizdat [Energoatomizdat], 1986, 224 p. (in Russian)
- [20] SanPiN 2.6.1.2523-09 «Normy radiacionnoj bezopasnosti» (NRB-99/2009) [Health regulations and Standarts 2.6.1.2523-09 of "Standard of radiation safety" (NRB-99/2009)]. (in Russian)
- [21] Bondarev P.V., Izmajlov A.V., Tolstoj A.I. Fizicheskaja zashhita jadernyh obektov : uchebnoe posobie dlja vuzov [Physical protection of nuclear objects: Manual for higher education institutions]. M. Pub. MIFI [MEPhI], 2008, 584 p. (in Russian)
- [22] Postanovlenie Pravitelstva Rossijskoj Federacii ot 4 oktjabrja 2012 g. №1006 «Ob utverzhenii Pravil predostavlenija medicinskimi organizacijami platnyh medicinskih uslug» [The resolution of the Government of the Russian Federation of October 4, 2012 N 1006 "About the approval of Rules of providing paid medical services by the medical organizations"]. (in Russian)
- [23] Federalnyj zakon Rossijskoj Federacii ot 21.11.2011 (v redakcii 25.11.2013) goda. №323-FZ «Ob osnovah ohrany zdorovja grazhdan v Rossijskoj Federacii» [The federal law of the Russian Federation, 21.11.2011 (an edition 25.11.2013) №323-FL "About bases of protection of public health in the Russian Federation"]. (in Russian)
- [24] Zakon Rossijskoj Federacii ot 15 maja 1991 g. №1244-1 «O socialnoj zashhite grazhdan, podvergnutih vozdejstvu radiacii vsledstvie katastrofy na Chernobylskoj AJeS» [The act of the Russian Federation of May 15, 1991 № 1244-1 "About social protection of the citizens who were affected by radiation owing to accident on the Chernobyl NPP"]. (in Russian)
- [25] Borovoj A.A., Velihov E.P. Opyt Chernobylja (raboty na obekte «Ukrytie») [Experience of Chernobyl (work on an object "Shelter")]. Part 3. M. Pub. NIC «Kurchatovskij institut» [National Research Center «Kurchatov Institute»], 2013, ISBN 978-5-904437-90-9, 156 p. (in Russian)
- [26] Metodika opredelenija stoimosti stroitelnoj produkcii na territorii Rossijskoj Federacii». MDS 81-35.2004 ["Technique of determination of cost of construction production in the territory of the Russian Federation" of MDS 81-35.2004]. (in Russian)
- [27] Pinaev V.E., Kasimov D.V., Afanaseva O.O. Voprosy rekultivacii zemel – opyt podgotovki glavy dlja Proekta meroprijatij po ohrane okruzhajushhej sredy [Questions of recultivation of lands – experience of training of the head for the Project of actions for environmental protection]. Mir nauki [World of science], 2015, №1. Available at: <http://mirnauki.com/PDF/13EMN115.pdf> (in Russian)
- [28] Pinaev V.E., Kasimov D.V. Ocenka vozdejstvija na pochvenno-rastitel'nyj pokrov – praktika provedenija pri OVOS ["Assessment of impact on a soil and vegetable cover – practice of carrying out at EIA"]. Naukovedenie [Science of science], №6(24), Issue nojabr-dekabr 2014 [Issue Novenber-December 2014]. ISSN 2223-5167, DOI: 10.15862/121EVN614, Availble at:

- <http://naukovedenie.ru/PDF/121EVN614.pdf> (in Russian)
- [29] Zhilishhnyj kodeks Rossijskoj Federacii. Statja 38 [Housing code of the Russian Federation. Article 38]. (in Russian)
- [30] O normative stoimosti odnogo kvadratnogo metra obshhej ploshhadi zhilogo pomeshhenija po Rossijskoj Federacii na pervoe polugodie 2016 goda i pokazateljah srednej rynochnoj stoimosti odnogo kvadratnogo metra obshhej ploshhadi zhilogo pomeshhenija po subektam Rossijskoj Federacii na I kvartal 2016 goda. Prikaz Ministerstva stroitelstva i zhilishhno-kommunalnogo hozjajstva Rossijskoj Federacii ot 28 dekabrya 2015 g. №951/pr. ["About the standard of the cost of one square meter of total area of premises for the Russian Federation on the first half of the year 2016 and indicators of the average market value of one square meter of total area of premises on subjects of the Russian Federation for the I quarter 2016". The order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Ministry of Construction of Russia) of December 28, 2015] Moscow. (in Russian)

### **The Material Costs in the Aftermath of Radioactive Pollution as a Result of Radiation Accident at Nuclear Facilities**

**A.P. Elokhin\*, I.A. Starodubtcev\*\***

*Department of Automation Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

*\* e-mail: [elokhin@yandex.ru](mailto:elokhin@yandex.ru); \*\* e-mail: [81-720@mail.ru](mailto:81-720@mail.ru)*

**Abstract** – The work on the example of a hypothetical accident at the nuclear facilities (nuclear facilities) presented the scenario that determines the sequence of works relating to the registration of ionizing radiation caused by the release of gas-aerosol radioactive impurities in the atmosphere, as well as the assessment of radioactive air pollution and the underlying surface in the propagation of impurities on wind. The estimation of dose loads on the personnel and population of the region came under the torch of the radioactive release, and work to eliminate the consequences of the radioactive pollution of the environment. A mathematical formulation of the statement on the assessment of the radioactive contamination of the environment problems and methods of its solution, as well as evaluation of environmental damage, including populated areas, farmland, parks, nature reserves and natural nature reserves.

*Keywords:* radiation accident at the nuclear facilities, registration of ionizing radiation, radioactive release torch assessment of radioactive contamination of air basin and the underlying surface, evaluation of radiation exposure of personnel and population of the region, assessment of environmental damage.