

Программный комплекс для оценки и прогнозирования радиационной ситуации в Чернобыльской зоне отчуждения

Приведено описание структуры и возможностей программного комплекса, предназначенного для оценок и прогнозирования радиационной ситуации в Чернобыльской зоне отчуждения (ЧЗО). Комплекс позволяет рассчитывать поля концентрации радионуклидов в приземном воздухе, плотности выпадений на земную поверхность, дозы облучения как при аварийных выбросах из радиационно-опасных объектов в ЧЗО, так и в случае повышенной эмиссии радионуклидов с поверхности земли при экстремальных погодных условиях (включая вторичный ветровой подъем и лесные пожары).

Ключевые слова: аварийные выбросы, Чернобыльская зона отчуждения, моделирование атмосферного переноса.

М. М. Талерко, Е. К. Гаргер, Г. Г. Кузьменко

Програмний комплекс для оцінки та прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження

Наведено опис структури та можливостей програмного комплексу, призначеного для оцінок та прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ). Комплекс дозволяє розраховувати поля концентрації радіонуклідів в приземному повітрі, щільності випадіння на земну поверхню, дози опромінення як при аварійних викидах з радіаційно-небезпечних об'єктів у ЧЗВ, так і у разі підвищеної емісії радіонуклідів з поверхні землі при екстремальних погодних умовах (включаючи вторинний вітровий підйом та лісові пожежі).

Ключові слова: аварійні викиди, Чорнобильська зона відчуження, моделювання атмосферного перенесення.

© Н. Н. Талерко, Е. К. Гаргер, А. Г. Кузьменко, 2010

Радиационное состояние в пределах Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО), сложившееся в поставарийный период, определяется прежде всего картиной радиоактивных выпадений на территории ЧЗО, а также наличием ряда потенциально опасных объектов (объект «Укрытие», ХОЯТ, пункты временной локализации радиоактивных отходов, пункты захоронения радиоактивных отходов и т. п.). На территории ЧЗО в различных компонентах природных экосистем сосредоточено около 5,5 ПБк ^{137}Cs , 2,5 ПБк ^{90}Sr , 0,1 ПБк трансурановых элементов (ТУЭ) [1]. В пунктах временной локализации радиоактивных отходов и пунктах захоронения радиоактивных отходов находится 4,5 ПБк ^{137}Cs , 3,5 ПБк ^{90}Sr , 0,1 ПБк ТУЭ [1]. В объекте «Укрытие» локализовано около 340 ПБк радионуклидов [1]. На концентрацию радионуклидов в приземном слое атмосферы над территорией ЧЗО и связанной с ней дозой облучения персонала влияют также природные и антропогенные факторы: вариабельность погодных условий, проведение строительных и земляных работ в различных участках ЧЗО, возникновение лесных пожаров и др. Кроме того, нельзя исключить и возможность возникновения аварийных ситуаций на радиационно опасных объектах в ЧЗО, что может привести к значительному повышению концентрации радионуклидов в воздухе и доз облучения персонала ЧЗО.

Созданная к настоящему времени в ЧЗО сеть постов измерений концентрации радиоактивных аэрозолей в атмосферном воздухе, радионуклидных выпадений и мощности экспозиционной дозы в целом обеспечивает контроль радиационного состояния в ЧЗО [2]. Тем не менее приоритетной задачей является дальнейшее повышение аварийной готовности, обеспечивающее защиту персонала ЧЗО и население прилегающих территорий. Эта задача в настоящий период решается в рамках работы, выполняемой корпорацией «Укратомприбор» по заказу Государственного специализированного научно-производственного предприятия «Экоцентр». В Институте проблем безопасности АЭС НАН Украины, являющемся соисполнителем этой работы, разработан программный комплекс, предназначенный для прогнозирования развития аварийной ситуации в ЧЗО и ее последствий с целью обеспечения защиты персонала и населения рядом с ее границами. В статье приводится краткая характеристика возможностей комплекса и описание включенных в него физико-математических моделей поступления радионуклидов в атмосферу над территорией ЧЗО, их атмосферного распространения и осаждения на подстилающую поверхность.

Общая характеристика комплекса

Программный комплекс создан на основе физико-математических моделей эмиссии, атмосферного переноса и осаждения радионуклидов. Предназначен для расчетов объемной и поверхностной концентрации радионуклидов в пределах ЧЗО, доз внешнего и внутреннего (за счет ингаляционного поступления) облучения персонала ЧЗО и населения рядом с ее границами. Может использоваться как при нормальных условиях в ЧЗО, так и при повышенной эмиссии радионуклидов в воздухе (аварийные ситуации на радиационно-опасных объектах в ЧЗО, экстремальные погодные условия).

Особенностью комплекса является его возможность рассчитывать распространение выбросов в атмосфере от

нескольких источников одновременно (в данной версии — от одного до трех включительно). При этом рассматриваются источники трех различных типов, для описания которых необходимо использование принципиально различных моделей.

Комплекс состоит из следующих блоков:

1. Лагранжево-эйлерова модель атмосферного переноса радионуклидов LEDI, предназначенная для расчетов распространения радиоактивной примеси в атмосфере от высотных точечных или объемных источников (вентиляционные трубы, здания) [3].

2. Модель распространения радионуклидов в атмосфере вследствие их подъема с поверхности земли (площадной поверхностный источник), предназначенная для оценок загрязнения воздуха при естественном ветровом переносе радионуклидов с радиоактивно загрязненного участка или техногенном подъеме вследствие проведения на нем строительных или земляных работ, интенсивного движения тяжелой техники и пр.

3. Модель подъема и распространения радионуклидов в атмосфере вследствие лесных пожаров (или пожаров на участках травы) в пределах ЧЗО.

4. Блок расчета доз внешнего облучения от радиоактивности в воздухе и в выпадениях на земную поверхность и доз внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов в организм человека.

Указанный набор моделей объединен общим интерфейсом, позволяющим пользователю получать входную информацию о метеорологической обстановке в пределах ЧЗО, выбирать параметры источников радиоактивного загрязнения, производить расчеты и заносить их результаты в общую базу данных (БД) измерений и расчетной информации.

Комплекс рассчитывает указанные выше характеристики для нуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am — основных дозообразующих нуклидов в пределах ЧЗО в настоящее время. Кроме того, в список нуклидов, для которых может быть произведен расчет, включен ^{131}I , образование и выход в атмосферу которого возможны в результате проектной радиационной аварии на ХОЯТ-1 [4].

Программный комплекс позволяет работу в двух режимах: он-лайн (комплекс получает все необходимые для моделирования исходные данные в режиме реального времени) и офф-лайн (ретроспективное моделирование по сохраненным в БД метеорологическим параметрам и данным по источникам из БД или заранее сохраненным в БД сценариям выброса).

Комплекс оценивает текущую радиационную ситуацию и прогнозирует ее развитие на период от 1 до 24 ч.

В результате моделирования могут быть получены пространственные распределения (для территории ЧЗО) и динамика во времени:

объемных концентраций отдельных радионуклидов в приземном воздухе и плотности выпадений на подстилающую поверхность;

мощности дозы внешнего облучения за счет радионуклидов, находящихся в воздухе и на земной поверхности;

мощности дозы внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов;

интегральные по времени значения объемных концентраций и указанных доз за заданный период расчета.

Указанные значения рассчитываются в узлах регулярной сетки, покрывающей территорию ЧЗО размером 50×50 км с шагом 500 м, и в точках расположения

39 постов АСКРО в пределах ЧЗО (постах контроля МЭД) и в 28 населенных пунктах вблизи границ ЧЗО.

Одновременно с сохранением результатов расчетов сохраняются сценарии выбора количества, состава и отдельных характеристик источников радиоактивного загрязнения воздуха, использованные в ходе текущей расчетной сессии, а также ссылки на метеорологические данные из БД, использованные для расчетов.

Интерфейс программного комплекса включает:

а) главное окно с картографической информацией о ЧЗО (основные картографические слои) и результатами расчетов (в виде изолиний расчетных полей). Пользователь имеет возможность просматривать временную динамику любой из рассчитанных величин;

б) окно редактора сценариев, позволяющего формирование нового сценария выбросов, а также редактирование созданных ранее. Каждый из сценариев включает количество и тип источников, время начала и длительность выброса, их координаты, нуклидный состав и мощность выброса, геометрические размеры источников и т. п.;

в) окно представления результатов расчетов для постов АСКРО, расположенных в ЧЗО, в численном (табличном) виде и в виде графиков временной динамики изменения рассчитанных величин;

г) окно представления результатов расчетов в населенных пунктах вблизи ЧЗО в виде, аналогичном для постов АСКРО.

Лагранжево-эйлерова модель распространения радионуклидов в атмосфере LEDI

Лагранжево-эйлерова диффузионная модель переноса примеси в атмосфере LEDI [3] разработана для расчетов переноса примеси на расстояния до 1000 км от газоаэрозольного «точечного» источника с эффективной высотой выброса от 0 до 1500 м.

Модель учитывает следующую входную информацию: нестационарность метеорологических характеристик (вследствие суточного хода параметров пограничного слоя атмосферы или изменений погоды);

пространственную неоднородность метеорологических характеристик;

различные типы источника по длительности выброса (залповый, конечного времени действия, непрерывный), фазовому (газовый, аэрозольный) и изотопному составу;

горизонтальную неоднородность подстилающей поверхности.

Источник выброса в атмосферу моделируется в виде последовательности выбросов («клубов») с учетом изменчивости количества вещества или активности в них. В модели используется сочетание лагранжевого и эйлерового методов к описанию распространения примеси в пограничном слое атмосферы. Такой подход позволяет при относительно небольших затратах времени для расчетов на ЭВМ физически корректно учесть основные факторы, определяющие перенос примеси. Трехмерная задача расчета распространения примеси в атмосферном пограничном слое разбивается на три стадии:

1) вычисления горизонтальной траектории распространения примеси на основе лагранжевого метода частицы;

2) расчеты вертикального профиля концентрации примеси в узлах горизонтальной траектории, выполняемые с помощью одномерного полуэмпирического уравнения

турбулентной диффузии. Уравнение учитывает вертикальную турбулентную диффузию, гравитационное оседание аэрозольных частиц, сухое и влажное осаждение примеси на подстилающую поверхность, вертикальные движения воздуха синоптического масштаба, изменения количества примеси в атмосфере благодаря химическим реакциям или радиоактивному распаду. Вертикальный профиль коэффициента турбулентности параметризован согласно теории подобия Монина-Обухова;

3) вычисление распределения концентрации примеси в поперечном направлении, которое полагается нормальным с дисперсией, параметризованной как сумма вкладов горизонтальной турбулентной диффузии и расширения струи примеси за счет взаимодействия поворота ветра с турбулентностью в пограничном слое атмосферы.

Модель использует следующую входную информацию:

- а) метеорологическую (данные измерений полей температуры и ветра в слое до 3 км, данные о количестве осадков);
- б) данные о параметрах выброса (мощность выброса, его фазово-нуклидный состав и т. д.);
- в) данные о характеристиках подстилающей поверхности (рельеф, растительность).

Модель распространения загрязняющей примеси в атмосфере вследствие ветрового подъема с площадного наземного источника

В основу данной модели положена гауссова модель струи от точечного высотного источника (модель МАГАТЭ) [5], обобщенная для случая распространения тяжелой примеси.

Обобщение этого подхода к расчету атмосферного распространения радиоактивности от поверхностного источника прямоугольной формы с размерами $2a \times 2b$ (рис. 1) и плотностью радиоактивного загрязнения Q (Бк/м²), которая предполагается постоянной в пределах источника, приводит к следующему выражению для концентрации радиоактивной примеси в воздухе вблизи поверхности земли ($z = 0$) в точке с координатами x_0, y_0 (начало координат помещено в центр прямоугольного источника):

$$c(x_0, y_0, 0) = \frac{jQ f_R f_F f_W}{U \sqrt{2}} \times \frac{1}{O}$$

$$\times \left\{ \int_{L_A}^{L_B} \frac{dL \cdot \exp\left(-\left(W_g \cdot L/U\right)^2\right)}{\sigma_z(L)} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{AB}{\sqrt{2}\sigma_y(L)}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{AD}{\sqrt{2}\sigma_y(L)}\right) \right] + \int_{L_B}^{L_D} \frac{dL \cdot \exp\left(-\left(W_g \cdot L/U\right)^2\right)}{\sigma_z(L)} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{BC}{\sqrt{2}\sigma_y(L)}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{AD}{\sqrt{2}\sigma_y(L)}\right) \right] + \int_{L_D}^{L_C} \frac{dL \cdot \exp\left(-\left(W_g \cdot L/U\right)^2\right)}{\sigma_z(L)} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{CD}{\sqrt{2}\sigma_y(L)}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{BC}{\sqrt{2}\sigma_y(L)}\right) \right] \right\} \quad (1)$$

где $AD = (y_0 + b)/\cos \alpha - L \cdot \operatorname{tg} \alpha$; $AB = -(a + x_0)/\sin \alpha + L \cdot \operatorname{ctg} \alpha$; $BC = (y_0 - b)/\cos \alpha - L \cdot \operatorname{tg} \alpha$; $CD = (a - x_0)/\sin \alpha + L \cdot \operatorname{ctg} \alpha$; c — концентрация примеси, Бк/м³; j — интенсивность подъема радиоактивных аэрозолей в атмосферу вследствие

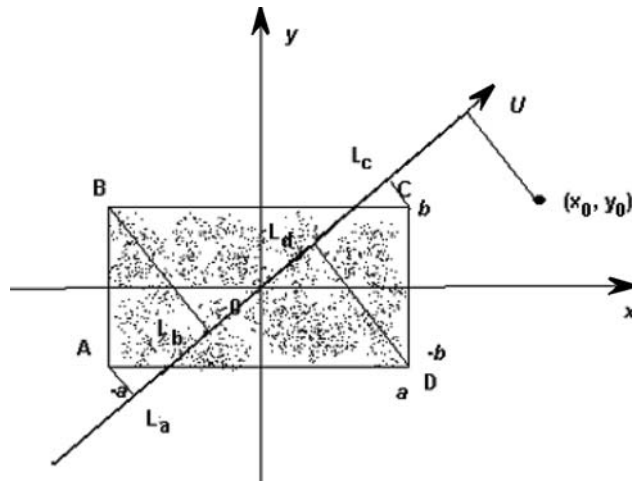


Рис. 1. Схема расположения поверхностного прямоугольного источника и связанной с ним декартовой системы координат: L_a, L_b, L_c, L_d — точки проекций вершин A, B, C, D прямоугольника на прямую вдоль направления ветра (направление ветра показано стрелкой); x_0, y_0 — координаты точки, в которой вычисляется значение объемной концентрации

естественного ветрового подъема или техногенной деятельности, $1/c$; $\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок; α — направление ветра, град; U — скорость ветра, м/с; σ_y, σ_z — стандартные отклонения распределения координат частиц примеси соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях, м, определяемые согласно [5]; W_g — гравитационная скорость падения аэрозольной частицы, м/с.

Коэффициенты f_R, f_F и f_W представляют собой поправки на радиоактивный распад, снижение концентрации радионуклида в воздухе за счет его осаждения на подстилающую поверхность и влажного вымывания атмосферными осадками соответственно, определяемые согласно [5].

Рис. 1 и формула (1) соответствуют ситуации, когда направление ветра находится в пределах $[180; 180 + \arctg(a/b)]$ (интегрирование проводится по переменной L по отрезкам в последовательности $L_a L_b, L_b L_d, L_d L_c$). Для других направлений формула (1) легко модифицируется.

Параметризация интенсивности подъема радиоактивных аэрозолей в атмосферу j для различных условий вторичного подъема аэрозоля в атмосферу проводится согласно [6].

Входная метеорологическая информация для модели — стандартные данные наблюдений на метеостанции, по которым определяются скорость и направление приземного ветра и класс устойчивости нижнего слоя атмосферы по Пасквиллу.

Модель для расчета подъема и атмосферного переноса радиоактивных аэрозолей при лесных пожарах

Наблюдения показывают, что над территорией лесного пожара в зависимости от размеров и типа пожара, его тепловых характеристик, а также метеорологических условий может либо формироваться, либо не формироваться конвективная струя (колонка) над территорией пожара. Ко второму случаю также относится завершающая стадия лесного пожара, при которой происходит тление горючих материалов.

Для моделирования атмосферного переноса радиоактивности при лесных пожарах на радиоактивно загрязненной территории ЧЗО используется комплекс моделей, описывающий подъем и распространение аэрозольных частиц для различных режимов формирования полей воздушных потоков над территорией пожаров, — конвективного и неконвективного.

Критерий условия реализации каждого из указанных режимов в простейшем случае нейтрально стратифицированной атмосферы был рассмотрен Байрамом [7]. Оценки показали, что для интенсивности тепловыделения с единицы кромки пожара, равной 50 кВт/м (это значение может рассматриваться как среднее для рассматриваемых условий), скорость ветра, при которой происходит смена режимов, равна 4 м/с. Это значение принято в качестве критерия выбора модели для расчетов атмосферного переноса радиоактивных аэрозолей: при скорости ветра до 4 м/с используется модель конвективного режима факела над лесным пожаром, при большей — модель неконвективного режима.

Конвективный режим формирования факела над лесным пожаром. В этом случае в атмосфере над пожаром формируется вертикальная или наклонная конвективная колонка. Дымовые частицы могут подниматься восходящими воздушными потоками в струе на высоту до 1–3 км. Восходящая воздушная струя должна рассматриваться как вертикальный (или наклонный) протяженный источник радиоактивной примеси вследствие подъема аэрозольных частиц и их выноса в окружающую атмосферу через боковые границы струи. Далее вне конвективной струи распространение радиоактивного аэрозоля определяется ветром в слое подъема конвективной струи, турбулентными свойствами атмосферы, характеристиками аэрозоля и может быть рассчитано с помощью обычных методов моделирования диффузионного переноса.

В этом случае модель состоит из двух блоков, описывающих:

а) формирование перегретой конвективной струи над территорией пожара;

б) последующее рассеяние примеси в атмосфере под влиянием атмосферной турбулентной диффузии и адвективного переноса.

Для расчетов траектории и внутренних параметров перегретой конвективной струи в стратифицированной атмосфере и сносящем потоке реального поля ветра (с изменяющимися по высоте скоростью и направлением) использована численная модель [8], применявшаяся для оценок доз облучения пожарных в ЧЗО [9]. С ее помощью рассчитывается, в частности, интенсивность выноса аэрозольных частиц через боковую поверхность струи как функция высоты. Далее активный участок струи (на котором ее температура выше окружающей атмосферы) представляется как протяженный источник радиоактивных аэрозолей для расчетов по диффузионным моделям. С этой целью он разбивается на слои, каждый из которых рассматривается как источник с определенными высотой, интенсивностью выброса и горизонтальными размерами. Далее каждый слой рассматривается как источник аэрозолей для диффузионной модели. Дальнейшее загрязнение окружающей атмосферы каждым таким источником оценивается с помощью ларанжево-эйлеровой модели LEDI, описанной выше. Общее загрязнение воздуха рассчитывается как сумма вкладов каждого слоя конвективной струи.

Неконвективный режим распространения дыма над территорией пожара. Этот режим характеризуется отсутствием отчетливо выраженной конвективной колонки над территорией пожара. При этом дымовая струя прижимается к земле, т. е. реализуется так называемый режим плюмажа. В этом случае площадь пожара можно рассматривать как площадной наземный источник радиоактивных аэрозолей, поступающих в воздух при горении.

Для расчетов распространения радиоактивной примеси от лесного пожара при неконвективном режиме его протекания используется модель распространения радионуклидов в атмосфере вследствие их подъема с поверхности земли (площадной поверхностный источник), изложенная выше. При этом в (1) интенсивность ветрового подъема j заменяется отношением k/T , где k — оценка доли активности, поднимающейся в атмосферу при пожаре, от общего запаса радиоактивности в лесном массиве на выгоревшей территории, которая в модели положена равной 0,04 [7]; T — длительность пожара, с.

При сложной форме территории, охваченной пожаром, она может быть разбита на ряд прямоугольных областей, и расчет проводится по каждому источнику отдельно.

Методы расчета доз облучения

Мощность эффективной дозы внешнего облучения человека на открытой местности от радионуклидов в воздухе («облачная» компонента внешнего облучения) H_{air} , Зв/с, может быть рассчитана по формуле [10]

$$H_{air} = A_V B_a, \quad (2)$$

где A_V — объемная концентрация радионуклида в приземном слое атмосферы, Бк·м⁻³; B_a — дозовый коэффициент внешнего облучения фотонами от радиоактивного облака, Зв·м³/(с·Бк).

Аналогично мощность эффективной дозы внешнего облучения человека на открытой местности от радионуклидов в выпадениях на земную поверхность H_{dep} , Зв/с, может быть рассчитана по формуле [10]

$$H_{dep} = A_D B_d, \quad (3)$$

где A_D — плотность выпадений радионуклида на земную поверхность, Бк·м⁻²; B_d — дозовый коэффициент внешнего облучения фотонами от выпадений радионуклида на земную поверхность, Зв·м²/(с·Бк).

Дозовые коэффициенты для нуклидов, учитываемых в разработанном расчетном комплексе, определяются согласно [11].

Для расчетов полной мощности дозы внешнего облучения выполняется интегрирование по заданному периоду и суммирование вкладов всех нуклидов.

Мощность эффективной дозы внутреннего облучения вследствие ингаляционного поступления радионуклидов в организм человека H_{inh} , Зв/с, рассчитывается согласно модели [12]:

$$H_{inh} = A_V \cdot B \cdot DC, \quad (4)$$

где A_V — концентрация радионуклида в воздухе, Бк/м³; B — скорость дыхания человека, м³/с; DC — дозовый коэффициент ингаляционного облучения, Зв/Бк.

Особенностью данной модели является учет зависимости дозы ингаляционного облучения от возраста человека. Референтные значения скорости дыхания человека

задаются согласно [13]. Учитывая, что оценки доз облучения с использованием разработанного комплекса будут применяться в основном для персонала, работающего в ЧЗО, они проводятся для категории «Взрослые».

Заключение

После планируемого ввода в эксплуатацию комплекса современных средств метеорологических измерений на территории ЧЗО в полном объеме (сонар, три автоматические метеостанции, высотная мачта для измерений вертикальных профилей метеоэлементов) разработанный программный комплекс обеспечит оперативную поддержку принятия решений о введении контрмер по защите персонала, работающего на территории ЧЗО, и населения вблизи ее границ при возникновении ситуаций повышенной радиологической опасности.

В дальнейшем он может быть усовершенствован для выполнения более широкого круга задач.

1. С помощью программного комплекса может прогнозироваться развитие радиационной обстановки за пределами ЧЗО в случае событий, приводящих к значительному выносу радиоактивности за пределы зоны отчуждения (в частности, аварийные ситуации на объекте «Укрытие» и лесные пожары на загрязненной территории). Лагранжево-эйлерова модель LEDI, включенная в разработанный комплекс, позволяет рассчитывать перенос радиоактивности на мезомасштабные расстояния порядка десятков и сотен километров (например, для Киева и других крупных населенных пунктов Украины и Беларуси), а также трансграничный перенос (страны Восточной и Западной Европы, Россия). Однако для реализации такой задачи программный комплекс должен быть обеспечен входной метеорологической информацией в виде данных модели численного прогноза погоды с высоким разрешением по пространству порядка 10–30 км по горизонтали (например, данные моделей MM5, WRF, HIRLAM).

2. В реальных условиях неопределенность оценок мощности источника выброса радиоактивности в атмосферу может достигать нескольких порядков. С целью минимизации погрешности расчетов, выполняемых комплексом, целесообразно включить в его состав блок восстановления параметров источника выброса, основанный на решении обратной задачи распространения радиоактивного выброса в атмосфере. Это позволит уточнить мощность параметров источника радиоактивного выброса, используя данные измерений, проводящихся в ЧЗО (объемные концентрации, выпадения, МЭД).

Список литературы

1. 20 років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє: Національна доповідь України. — К.: Атіка, 2006. — 224 с.
2. Кіреєв С. Ш., Годун Б. А., Деревець В. В. та ін. Радіаційно-екологічний моніторинг навколишнього середовища в зоні відчуження. Досвід та перспективи розвитку // Міжнар. конф. «Двадцять років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє», Київ, 24–26 квітня 2006 р.
3. Талерко Н. Н., Гаргер Е. К. Опыт тестирования модели атмосферного переноса LEDI на основе натуральных экспериментов и Чернобыльских данных: Препринт / НАН Украины. Институт проблем безопасности АЭС, 05–1 (2005). — 16 с.
4. Chernobyl NPP Liquid Radwaste Treatment Safety Analysis report (Final Revision 3). T-KEY-N/6//1000117/00103 rev. 2 — 30.05.2003.
5. Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting: A safety guide, Safety series No. 50-SG-S3. — Vienna: IAEA, 1980.
6. Гаргер Е. К. Вторичный подъем радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы. — Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. — 192 с.
7. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. — Новосибирск: Наука, 1992. — 408 с.
8. Талерко Н. Н. Расчет подъема радиоактивной примеси из аварийного блока Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. — 1990. — № 10. — С. 39–46.
9. Kashparov V. A., Lundin S. M., Kadygrib A. M. et al. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters // Journal of environmental radioactivity. — 2000. — V. 51. — P. 281–298.
10. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справ. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 224 с.
11. Eckerman K. F., Leggett R. W. DCFPAK: Dose coefficient data file package for Sandia National Laboratory, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-13347. — Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 1996.
12. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5 Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26 (1). — Oxford: Pergamon Press, 1996.
13. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4 Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25 (3–4). — Oxford: Pergamon Press, 1995.

Надійшла до редакції 27.07.2010.