

Прогноз и анализ дозиметрической обстановки при аварийных выбросах на АЭС Украины

Ю.В. Бончук, Г.Г. Ратиа

Научно исследовательский институт радиационной защиты (НИИ РЗ)
Академии технологических наук Украины, Киев

Комплекс оперативного анализа дозиметрической обстановки при радиационных авариях на атомных электростанциях Украины разработан для поддержки принятия решений. Аварийный выброс моделируется как последовательность дискретных элементов, испускаемых через небольшие временные интервалы, что позволяет учесть в расчетах неоднородность распределения загрязнения в облаке выброса. Рассчитываемые прогнозируемые и предотвращаемые дозы являются базовой информацией для оправданности экстренных и неотложных контрмер.

Ключевые слова: аварийный выброс, прогнозируемые дозы, предотвращаемые дозы, поддержка принятия решений, контрмеры.

1. Введение

Комплекс оперативного анализа дозиметрической обстановки при радиационных авариях на АЭС Украины (КАДО) является компьютерной системой для расчета характеристик радиационной обстановки при аварийном выбросе (для расстояний до 30 километров). Основная цель КАДО – поддержка принятия решений о контрмерах в соответствии с Нормами радиационной безопасности Украины.

2. Основная структура и модели

Исходные данные для расчетов состоят из параметров выброса и метеорологических данных. Параметры выброса включают высоту выброса и радионуклидный состав с указанием следующих характеристик для каждого радионуклида:

- референтного типа системного поступления (для аэрозолей) или референтного класса отложения (для газов);
- медианный по активности аэродинамический диаметр (AMAD) для аэрозолей;
- мощность выброса.

Метеорологические данные включают атмосферный класс устойчивости, скорость и направление ветра, интенсивность осадков. Все указанные параметры могут быть переменными во время выброса.

КАДО осуществляет поддержку данных о параметрах выброса в виде библиотеки составов выбросов.

Исходные данные используются для расчетов следующими модулями:

- расчета атмосферного переноса и выпадений на поверхность почвы;
- расчета доз внешнего облучения от радиоактивного облака;
- расчета доз внешнего облучения от выпадений на поверхность почвы;
- расчета доз внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления;
- расчета доз внутреннего облучения за счет перорального поступления при потреблении загрязненных продуктов питания;
- контрмер.

2.1. Атмосферный перенос и выпадение на поверхность почвы

Для оперативного прогноза аварийных выбросов АЭС на расстояниях до 30 км обычно используется Гауссова модель переноса в атмосфере [1, 2]. Эта модель применяется в предположении о постоянных метеорологических условиях и параметрах выброса. В КАДО используется нестационарная модель, которая учитывает изменение во времени всех вышеупомянутых параметров.

В этой модели непрерывный выброс каждого радионуклида разделяется на последовательность дискретных (элементарных) выбросов, испускаемых источником через достаточно малые временные интервалы. Выбор шага по времени определяется многими факторами, основными из которых являются скорость ветра, класс устойчивости атмосферы, высота выброса. При моделировании атмосферного переноса предполагается радиальная симметрия каждого элементарного выброса в горизонтальном направлении, то есть $\sigma_x = \sigma_y$. Распространение, выпадение на поверхность почвы и вымывание для каждого элементарного выброса моделируются согласно модели [1].

Объемные удельные активности в воздухе и плотности выпадений на поверхность почвы для каждого радионуклида рассчитываются суммированием соответствующих значений для каждого элементарного выброса. Во время этих расчетов учитываются также радиоактивный распад и появление дочерних радионуклидов.

2.2. Внешнее облучение от радиоактивного облака

Для расчета доз, формируемых внешним облучением от радиоактивного облака, в КАДО используются 2 модели:

- модель источника, равномерно распределенного в полубесконечном пространстве (модель 1);
- интегральная модель, учитывающая неравномерность распределения активности в пространстве (модель 2).

В модели 1 мощность дозы внешнего облучения определяется как произведение объемной удельной активности радионуклида в воздухе (A_v) и соответствующего значения дозы внешнего облучения на единицу содержания в воздухе – "дозового коэффициента" g^{cl} [3]. Использование этого подхода приемлемо для таких расстояний от

источника, при которых поле объемной удельной активности радионуклида практически однородно относительно рассматриваемой точки. Однако на малых расстояниях от аварийного источника выброса наблюдаются большие пространственные градиенты активности, и прямое использование модели 1 приводит к большим ошибкам в оценке дозы внешнего облучения от радиоактивного облака. Для устранения таких ошибок используется модель 2, основанная на решении задачи о поле мощности дозы внешнего гамма-излучения от Гауссовой струи [4].

В интегральной модели мощность эффективной дозы внешнего облучения каждого радионуклида в облаке (\dot{E}^{cl}) определяется как сумма следующих компонентов:

- доза внешнего облучения, сформированная гамма-излучением (\dot{E}^{γ});
- доза внешнего облучения, сформированная другими типами излучения (\dot{E}^r).

\dot{E}^r определяется согласно подходу, описанному в [4], для получения асимптотического выражения мощности дозы гамма-излучения от Гауссовой струи. Это значение учитывает неоднородность пространственного распределения активности. \dot{E}^r равно произведению \dot{E}^{cl} (полученного согласно модели 1) и коэффициента z^r (относительный вклад других типов излучения радионуклида в значение \dot{g}^{cl}). Значения z^r определяются для радионуклидов путем расчета \dot{E}^{cl} , выполненного для однородного полубесконечного источника при помощи модели 1, и посредством подхода [4], учитывая только гамма-излучение. Значения z^r определены для 132 радионуклидов, для некоторых из них они приведены в таблице 1.

Таблица 1

Относительный вклад других типов излучения в суммарную дозу внешнего облучения от облака (z^r)

Радионуклид	z^r	Радионуклид	z^r	Радионуклид	z^r
^{85}Kr	0,614	^{88}Rb	0,113	^{131}I	0,066
^{87}Kr	0,081	^{89}Sr	0,991	^{131}mXe	0,164
^{86}Rb	0,144	^{97}Zr	0,107	^{133}mXe	0,116

Для расчетов \dot{E}^{γ} используются спектральные характеристики радионуклидов: энергия гамма-излучения (E_i) и квантовый выход (z_i). Поскольку количество линий гамма-излучения для некоторых радионуклидов составляет несколько десятков, для вычислений используется сокращенная схема. В этой схеме применяется понятие константы "равновесной дозы" (Д), значение которой рассчитывается как: $\Delta = \sum_{i=1}^n E_i z_i$. Перед вычислениями все линии гамма-излучения сортируются в порядке уменьшения значений $E_i z_i$. Первые j линий спектра, полный вклад которых в значение Д превышает порог (как правило, 95%), рассматриваются как отдельные линии. Все остальные линии заменяются одной линией гамма-излучения с характеристиками \bar{E} и $\bar{\eta}$, которые рассчитаны по формулам:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=j+1}^n E_i \eta_i}{\sum_{i=j+1}^n \eta_i}, \quad \bar{\eta} = \sum_{i=j+1}^n \eta_i$$

Применение двух моделей позволяет выполнить более точный расчет доз внешнего облучения, формируемых радиоактивным облаком. С другой стороны, применение сокращенной схемы вычисления позволяет ограничить увеличение расчетного времени при использовании интегральной модели.

2.3. Внутреннее облучение за счет перорального поступления

В основу оценки перорального поступления положена модель ECOSYS [5], при этом в модели используются характерные для Украины уровни потребления продуктов питания. В КАДО используются наборы предварительно рассчитанных посуточных поступлений, сформированных выпадениями в каждый отдельный день года. Такие наборы рассчитаны для пяти референтных возрастов (от 1 года до взрослых).

Дозы внутреннего облучения, сформированные пероральным поступлением радионуклидов с загрязненными продуктами питания, имеют очевидную зависимость от сезонности выпадений (рис. 1).

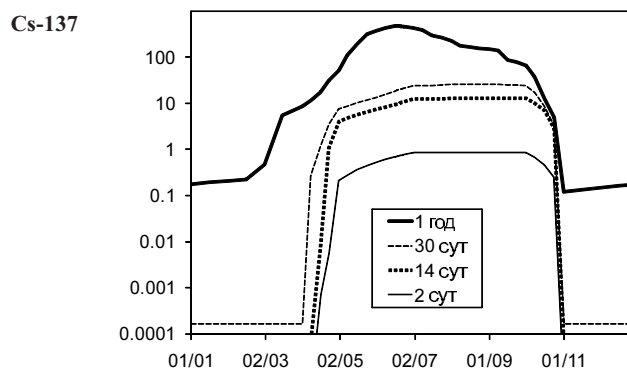
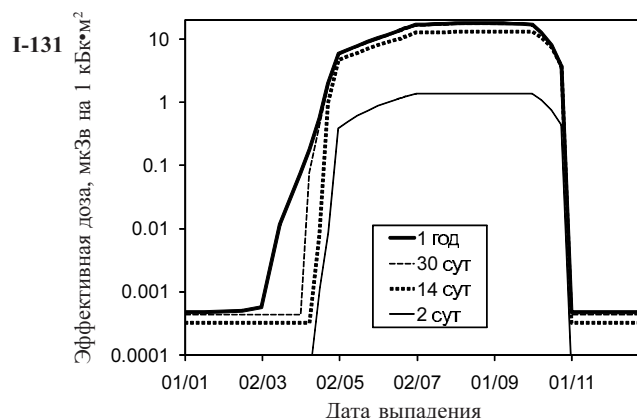


Рис. 1. Зависимость эффективных доз (формируемых у взрослых пероральным поступлением I-131 и Cs-137) от даты выпадений и продолжительности поступления (от 2 суток до 1 года)

Такая зависимость наиболее ярко проявляется для небольшой продолжительности перорального поступления после выпадений (до 30 суток на рисунке 1). Принимая во внимание, что в каждом отдельном году реальные периоды вегетации зерновых культур могут отличаться от модельных периодов, в КАДО применяется усреднение рассчитанных данных по 15 суткам (7 суток до и 7 суток после даты выпадений).

Последующий расчет доз внутреннего облучения выполняется согласно биокинетическим и дозиметрическим моделям Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Расчеты производятся с помощью внутренней базы данных дозовых коэффициентов, сформированной программным обеспечением IDSS (Internal Dosimetry Support System), разработанным Научно-исследовательским институтом радиационной защиты АТН Украины [6]. Внутренняя база данных содержит значения доз на единицу поступления более чем 700 радионуклидов (для 6 референтных возрастов). IDSS показал хорошее соответствие результатов собственных расчетов с дозовыми коэффициентами, опубликованными МКРЗ.

2.4. Внешнее облучение от выпадений на поверхность почвы

Расчет доз, сформированных внешним облучением от выпадений на поверхность почвы, выполнен на основе модели источника, равномерно распределенного на бесконечной плоскости. Мощность дозы облучения при этом приравнивается к произведению поверхностной удельной активности радионуклида (A_s) на соответствующий дозовый коэффициент – доза на единицу поверхностной активности (g^{stf}) [3]. В отличие от радиоактивного облака, неравномерность распределения активности на поверхности намного меньше влияет на дозы облучения, поэтому для их расчета применяется только упрощенная модель.

При расчете доз облучения от поверхности почвы используется коэффициент режима поведения, отражающий особенности облучения населения и соответствующим способом уменьшающий дозы облучения. С учетом данных [7], для населения применяются следующие значения этого коэффициента: 0,29 (села), 0,2 (поселки городского типа и малые города с преобладанием одноэтажных жилых домов) и 0,13 (города).

При расчетах доз облучения также учитываются накопление радионуклидов на почве в результате выпадений, уменьшение активности в результате радиоактивного распада и появление дочерних радионуклидов.

2.5. Внутреннее облучение за счет ингаляционного поступления

Для расчетов доз внутреннего облучения, сформированных ингаляционным поступлением при прохождении радиоактивного облака (так же, как для перорального поступления) используется база данных дозовых коэффициентов, созданная с помощью IDSS [6].

2.6. Контрмеры

Нормами радиационной безопасности Украины установлены критерии для экстренных и неотложных контрмер. Эти критерии определены в виде:

- поглощенных доз в органах (тканях) в течение первых двух суток (для экстренных контрмер);
- доз во всем теле, щитовидной железе и коже, предотвращенных в течение первых 2 недель после аварии при применении контрмеры (для неотложных контрмер).

Критерии экстренных контрмер установлены в виде прогнозируемых доз, поэтому для определения их оправданности выполняется прямое сравнение поглощенных доз с критериями. Для определения оправданности неотложных контрмер (эвакуация, укрытие, ограничение пребывания на открытом воздухе, йодная профилактика) необходимо рассчитать предотвращаемые дозы. Для этой цели используются графики применения контрмер (начало и продолжительность) и их эффективность (коэффициент уменьшения дозы для каждого пути формирования дозы). При расчетах доз учитывается возрастная дифференциация облучаемых лиц. КАДО рассчитывает предотвращаемые и непредотвращаемые дозы. Поскольку контрмеры могут быть применены с некоторой задержкой, их применение не может предотвратить прогнозируемую дозу полностью, а только уменьшить ее (иногда существенно). Поэтому некоторые контрмеры для населенных пунктов могут оказаться неоправданными, несмотря на то, что население может существенно облучиться при аварии.

3. Применение КАДО

По исходным данным, перечисленным в разделе 2, КАДО выполняет прогноз пространственного и временного распространения радиоактивного облака: рассчитывает изменение во времени активности радионуклидов в воздухе и выпадениях, а также мощности доз и дозы (рис. 2).

Для населенных пунктов зоны наблюдения АЭС дополнительно рассчитываются следующие значения:

- поглощенные дозы в органах (тканях) человека в течение первых двух суток после аварии;
- дозы (во всем теле, щитовидной железе и коже), предотвращенные в течение первых 2 недель после аварии при применении контрмер.

Результаты расчетов отображаются во временной динамике как для зоны наблюдения в целом, так и для отдельных населенных пунктов и дают возможность осуществить поддержку принятия решения о применении контрмер.

КАДО эксплуатируется на Ровенской АЭС с 2004 г. и получил высокую оценку экспертов Международного агентства по атомной энергии во время миссии OSART (Operational Safety Review Team) и экспертов трех миссий ВАО АЭС (Всемирной ассоциации организаций, эксплуатирующих атомные электростанции). Последние аварийные учения, на которых успешно использовался КАДО, были проведены Национальной атомной энергогенерирующей компанией «Энергоатом» (НАЭК «Энергоатом») в сентябре 2008 г. В настоящее время НАЭК "Энергоатом" планирует распространить КАДО на все действующие АЭС Украины.

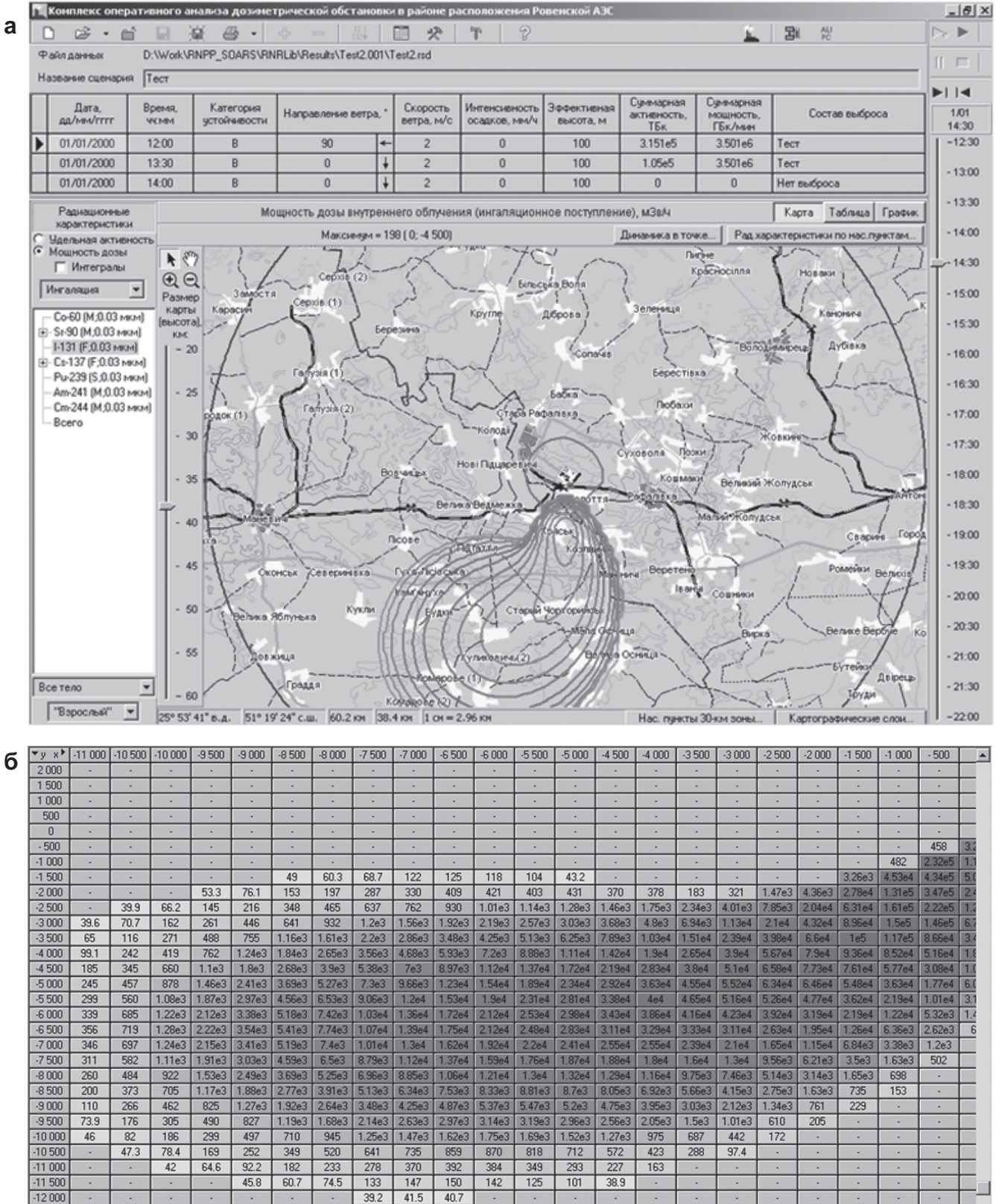


Рис. 2. Результаты расчетов в главном окне КАДО: а – мощности эффективных доз, формируемых за счет ингаляционного поступления (на карте); б – поле активности радионуклида (в таблице)

4. Выводы

1. КАДО включает комплекс моделей, дающих возможность выполнить прогноз радиационной и дозиметрической обстановки в зоне наблюдения АЭС в случае радиационной аварии.

2. КАДО с 2004 г. используется на Ровенской АЭС для поддержки принятия решений о применении контрмер в случае радиационной аварии.

3. Основываясь на высокой оценке КАДО миссиями OSART и ВАО АЭС, НАЭК «Энергоатом» планирует распространить КАДО на все действующие АЭС Украины.

Список использованной литературы

1. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting [Текст] // A Safety Guide: IAEA Safety series №. 50-SG-S3. – 1980.
2. Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases [Текст] // Exposures of critical groups: IAEA Safety series № 57. – 1982.
3. Eckerman, K.F. DCFPAK: Dose coefficient data file package for Sandia National Laboratory [Текст] / K.F. Eckerman, R.W. Leggett: Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM 13347. – Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge. – 1996.
4. Gorshkov, V.E. Reduced integral solutions for gamma absorbed dose from Gaussian plume [Текст] / V.E. Gorshkov, I.P. Karmazin, V.I. Tarasov // Health Phys. – 1995. – 69 (2), P. 210-218.
5. Muller, H. ECOSYS-87: A dynamic model for the assessment of the radiological consequences of nuclear accidents [Текст] / H. Muller, G. Prohl // Health Phys. – 1993. V – 64. – P. 232-252.
6. Berkovski, V. Internal Dosimetry Support System: Multipurpose Research Computer Code [Текст] / V. Berkovski, I. Likhtarev, G. Ratia, [et al.]. // Radiat. Prot. Dosim – 1998. – V – 79. – P. 71-374.
7. Likhtariov, I. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine [Текст] / I. Likhtariov, L. Kovgan, D. Novak // Health Phys. – 1996. – 70(1). – P. 87-98.

Iu.V. Bonchuk, G.G. Ratia

Prognosis and Analysis of Dosimetric Situation after Emergency Atmospheric Release of NPP in Ukraine

Radiation Protection Institute (RPI) of Academy of Technological Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. The system for the operative analysis of dosimetric situation after radiation emergencies at nuclear power plants in Ukraine is developed for decision making support. Emergency release is modelled as sequence of the discrete elements which are emitted after small time intervals that allows to take into account in calculations heterogeneity of distribution of pollution in a released cloud. Calculated predicted and avertable doses are the base information for justification of emergency and urgent countermeasures.

Key words: emergency release, predicted doses, avertable doses, decision making support, countermeasures.

Ю.В. Бончук

Тел. +38(044) 489-1027 E-mail: bonchuk@rpi.kiev.ua