

УДК 004.9:504:519.6

**ЛОКАЛИЗАЦІЯ ІСТОЧНИКА РАДІОАКТИВНОГО ВИБРОСА**А.Н. Романенко<sup>1</sup>, И.В. Ковалец<sup>2</sup>, Е.А. Евдин<sup>2</sup>, С.Н. Анулич<sup>2</sup><sup>1</sup>ГП НАЭК «Энергоатом» ОП «Ривненская АЭС»,<sup>2</sup>Институт проблем математических машин и систем НАН Украины

e-mail: roman@rnp.atom.gov.ua

**Введение.** При серьезных инцидентах, связанных с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, факт аварии и ее продолжительность становятся известны общественности. В случае менее значимых происшествий предприятие, на котором произошел выброс, не всегда информирует общественность о факте случившегося, а иногда и не знает об этом. Возникает необходимость поиска подобных источников при наличии результатов инструментального контроля.

**Моделирование обратного переноса.** Для локализации источников выбросов может быть использовано моделирование обратного переноса атмосферного загрязнения на основе сопряженных уравнений [1]. Как известно прямая задача атмосферного переноса имеет следующий вид:

$$\partial c / \partial t + u \partial c / \partial x + v \partial c / \partial y + w \partial c / \partial z + \text{Diff}(c) = S, \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – горизонтальные и вертикальная компоненты скорости,  $\text{Diff}$  – оператор диффузии,  $S$  – источниковый член. Прямая задача решается на некотором интервале времени  $(t_{\min}, t_{\max})$ . Обратной (или сопряженной) задачей атмосферного переноса будет

$$-\partial c^* / \partial t - u \partial c^* / \partial x - v \partial c^* / \partial y - w \partial c^* / \partial z + \text{Diff}(c^*) = p_n, \quad (2)$$

где  $c^*$  – сопряженная концентрация,  $p_n$  задано ненулевой константой в  $n$ -й точке измерений в тот период времени, когда наблюдались значительные концентрации. Сопряженное уравнение необходимо проинтегрировать в обратном направлении по времени от  $t_{\max}$  до  $t_{\min}$ . Для этого в данной работе использовалась прямая модель атмосферного переноса с заменой компонент скорости ветра в файлах численного прогноза погоды  $(u, v) \rightarrow (-u, -v)$  и инверсионной заменой времени, которому соответствуют файлы прогноза погоды:

$$\begin{aligned} NWP^{(u,v)}(t_{\min}) &\rightarrow NWP^{(-u,-v)}(t_{\max}), \\ NWP^{(u,v)}(t_{\min} + 1) &\rightarrow NWP^{(-u,-v)}(t_{\max} - 1), \\ &\dots \\ NWP^{(u,v)}(t_{\max}) &\rightarrow NWP^{(-u,-v)}(t_{\min}) \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $NWP$  обозначает наборы данных численного прогноза погоды для прямой и обратной задач. Влиянием вертикальной компоненты скорости на обратный перенос в данной работе пренебрегалось.

Расчет обратного распространения загрязнения с точки, где зарегистрировано изменение радиационной обстановки, формирует область возможного нахождения источника выброса. При наличии нескольких мест регистрации, область выброса будет находиться в пересечении областей обратных расчетов (рис. 1). Если имеется несколько обратных расчетов, то для соответствующих значений времени образования источника и его места нахождения для всех расчетов отношения активностей должны быть в определенных пределах, соответствующих результатам измерений. В этом случае ячейка является местом потенциального выброса.

В результате расчета переноса образуются значения радиационных параметров в широком диапазоне. Для поиска мест, с которых могут быть созданы радиационные загрязнения в месте регистрации, в выборку для анализа можно включать данные с активностью больше  $A_{\max}/УВ$ , где  $УВ$  – уровень включения. Если уровень включения

высокий, то для анализа используется большое количество ячеек. При уменьшении УВ зона поиска сужается (рис. 2).



Рис. 1. Определение области нахождения источника выброса (слева); определения места и времени выброса (справа)

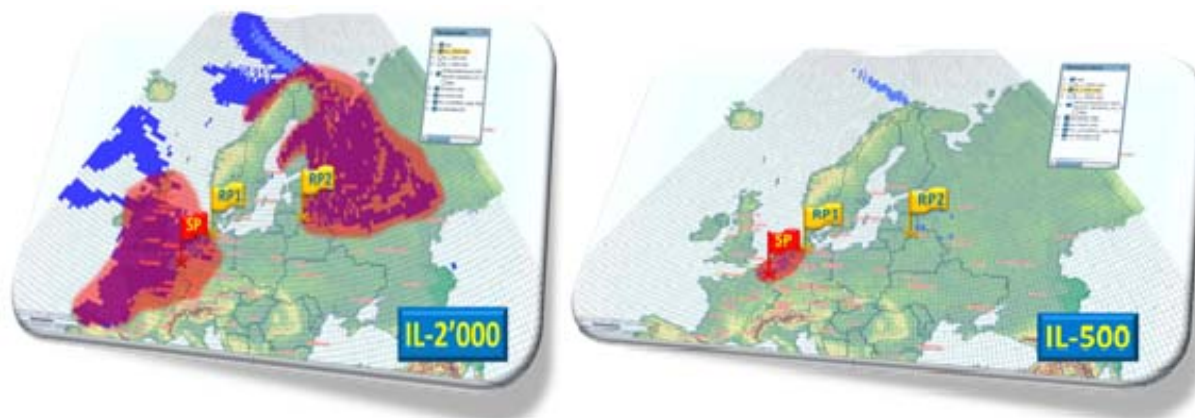


Рис. 2. Примеры расчетов – области возможного нахождения источника выброса с УВ=2000 (слева) и УВ=500 (справа)

Источник выброса не может появиться абсолютно в любом месте. Он должен быть связан с предприятием, где применяются ядерные материалы. Исключением могут быть транспортные аварии или террористические акты с «грязными» бомбами, но эти особые случаи в данной работе не рассматриваются. В общем случае, исходя из набора зарегистрированных изотопов, мы должны проверить наличие в этих отобранных местах соответствующих предприятий. Если их оказалось слишком много, мы можем увеличить уровень включения и наоборот.

Основная задача, решаемая с помощью задачи обратного переноса – определение места и времени выброса. Оценка активности выброса для каждого места регистрации  $A_i$  проводится с параметрами скорости ветра ( $u$ ,  $v$ ) и заданной активностью выброса  $A_0$  путем обратного деления:

$$A_i = A_0 \cdot \frac{A_{meas_i}}{A_{calc_i}} \quad (4)$$

где  $A_{meas_i}$  и  $A_{calc_i}$  измеренные и рассчитанные параметры для точки регистрации  $i$ .

**Реализации алгоритма обратной циркуляции атмосферы.** Для проведения обратных расчетов была использована Европейская система поддержки принятия решений при радиационных авариях JRODOS [2]. Прогноз распространения

радиоактивности производился с помощью модели дальнего переноса MATCH. Данная модель разработана Шведским гидрометеорологическим институтом и недавно прошла успешную верификацию по данным измерений после аварии на АЭС Фукусима [3]. Для функционирования системы JRODOS использовались данные численного прогноза погоды, рассчитанные с помощью мезомасштабной численной метеорологической модели WRF, конвертированные в формат модели MATCH с помощью специально разработанных программных средств [4].

**Результаты расчетов.** Были проведены многочисленные тестовые расчеты, которые подтвердили работоспособность расчетов с использованием обратного переноса. Результаты одного из расчетов, проведенных для локализации выброса, приведшего к повышению концентраций I-131 с 5 по 16 марта 2015 г. на Игналинской АЭС и в Вильнюсе частично приведены на рисунке 3. К сожалению, у авторов не было возможности проверить эти расчеты на основании достоверных данных о выбросах.

Проверка методики, предложенной в настоящей работе производилась на основании оценки активности выброса в результате пожара в Чернобыльской пуще в апреле – мае 2015 года. В данном случае стояла задача по оценке динамики выброса при наличии результатов измерений активности Cs-137 в районе Ровенской АЭС.

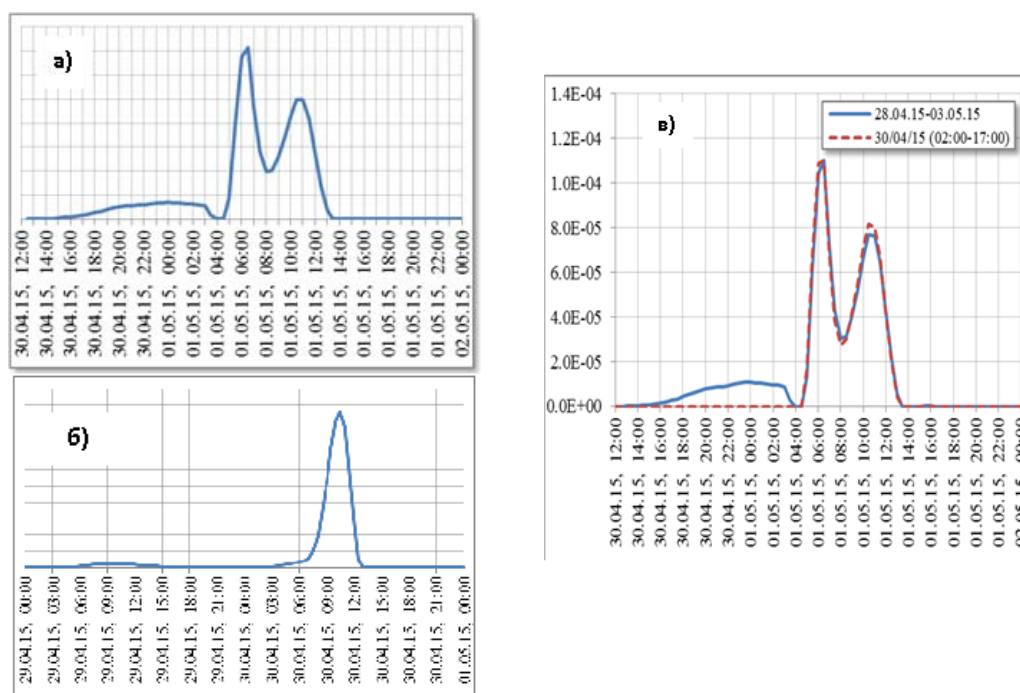


Рис. 3. Время прихода облака в г. Кузнецовск в результате пожара в Чернобыльской пуще (а); обратный расчет - время образования выброса в Чернобыльской пуще, создавшее повышение активности Cs-137 в атмосферном воздухе в районе РАЭС (б); проверка времени образования выброса (в)

В большинстве объектов района расположения РАЭС регистрируется Cs-137 чернобыльского происхождения. В атмосферном воздухе активность цезия до и после пожара находилась на уровне около  $6 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ . После предварительного анализа, проведенного 29 апреля 2015 года (см. также статью [5] в настоящем сборнике), было установлено, что основная часть облака от пожара будет приходить район РАЭС 1 мая 2015 года (рис. 3-а). Для регистрации выброса начиная с 29 апреля 2015 года на посту контроля АСКРО №18 (г. Кузнецовск) была проведена ежедневная смена фильтров, с помощью которых контролируется активность аэрозолей атмосферного воздуха. На

филтрах, експонированных с 30.04.15, 15:00 по 01.05.15, 08:00, активность Cs-137 составила  $23.1 \mu\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , с 01.05.15, 08:00 по 02.05.15, 08:00 -  $13 \mu\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

В результате обратного расчета установлено, что перенос в район расположения РАЭС был сформирован выбросом в период с 04:00 до 13:00 30.04 2015 года (рис. 3-б). Для уменьшения влияния краевых неопределенностей, интервал выброса был расширен: с 02:00 до 17:00 30.04.2015. Результат проверочного расчета (рис. 3-в) дал удовлетворительный результат.

На филтрах, установленных на посту контроля АСКРО РАЭС №18 интегральная удельная объемная активность (ИУОА) составила  $1.5 \text{ Бк}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-3}$ . Создание такой ИУОА приводит выброс из места пожара со средней мощностью выброса  $3.4\text{E}+05 \text{ Бк}\cdot\text{с}^{-1}$ . Суммарная активность выброса при пожаре в районе Чернобыльской пущи за период 30.04.15, 02:00 – 17:00 составила около 20 ГБк. Данные оценки согласуются с оценками, приведенными в работе [5], полученными на основании исследований закономерностей подъема радиоактивной пыли в Чернобыльской зоне отчуждения, опубликованных в научной литературе, и использовавшимися при проведении оперативных прогнозов в период пожаров.

**Выводы.** В работе предложена методика, позволяющая оценивать местоположение и интегральные характеристики выброса загрязнителя по данным измерений. В основе методики положено решение уравнения «обратного переноса» (или сопряженного уравнения атмосферного переноса), в предположении малого вклада вертикальных скоростей в результат обратного расчета. Методика предполагает наличие базы данных о возможных источниках загрязнения. Данная методика была реализована на основе модели дальнего переноса MATCH европейской системы ядерного аварийного реагирования JRODOS. В расчетах использовались данные численного прогноза погоды модели WRF. Верификация производилась на основании данных измерений концентраций цезия, проведенных на РАЭС в период пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения в апреле-мае 2015 г. Расчеты показали, что решение уравнения обратного переноса дает возможность произвести локализацию источника выброса при наличии нескольких мест измерения радиационных характеристик, а также частично восстановить динамические характеристики источника.

#### Список литературы

1. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. – М.: Наука, 1992. – 334 с.
2. Ievdin I. (2010) RODOS re-engineering: aims and implementation details / I. Ievdin, D. Trybushny, M. Zheleznyak [et al.] // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, N 5 –190p.
3. Kovalets I. V., Robertson L., Persson C., Didkivska S.N., Ievdin I.A. Trybushnyi D., 2013. Calculation of the far range atmospheric transport of radionuclides after the Fukushima accident with the atmospheric dispersion model MATCH of the JRODOS system // Int. J. of Environment and Pollution. – 2014. – Vol. 54, No 2/3/4. – P. 101-109
4. Didkivska S.N., Ievdin I.A., Kovalets I.V. Software to convert WRF output to HIRLAM-GRIB format to enable running of MATCHNERIS-TP(WP4)- (13)-01 // Report of the NERIS-TP Project NERIS-TP(WP4)-(13)-01, DOI: 10.13140/RG.2.1.4522.8961
5. Ковалец И.В., Романенко А.Н., Анулич С.Н., Евдин Е.А., 2015. Прогноз радиационной обстановки во время пожара в Чернобыльской зоне отчуждения с использованием системы JRODOS. Зб. доп. I-ї дист. наук.-практ. конф. з міжнар. участю “Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. СППР’2015”, Київ, 08 червня - 31 липня 2015 р.