

УДК 681.3.06, 621.039.58

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРИЙНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСАХ НА АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

*Д.В. Дзама, доктор физ.-мат. наук В.Н. Семенов,  
доктор физ.-мат. наук О.С. Сорокикова, А.Л. Фокин*  
ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

*В работе предлагается методика расчетной оценки радиационной обстановки вокруг АЭС при выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. В случае продолжительных выбросов (длящихся в течение суток и более) необходимо учитывать изменчивость метеорологических условий атмосферного переноса и рассеивания примесей. Это может быть достигнуто за счет многовариантных расчетов с использованием реальных метеорологических данных за прошедшее время. Предлагаемая в настоящей работе методика позволяет радикально уменьшить необходимое количество расчетов и, следовательно, общее время счета.*

**Ключевые слова:** обоснование безопасности ОИАЭ, радиационная обстановка, выбросы радиоактивных веществ, атмосферный перенос, расчетные модели, программные средства, время счета.

## METHODS FORESTIMATION OF RADIATION SITUATION THROUGH EMERGENCY RELEASE FROM NPP WITH USE OF REAL METEOROLOGICAL DATA

*D.V. Dsama, Dr. (Phys-Math) V.N. Semenov, Dr. (Phys-Math) O.S. Sorokovikova,  
A.L. Fokin*

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN)

*A method for numerical estimation of radiation situation around NPP through emergency atmospheric release is suggested. In the case of long-term releases (duration of one day or more) it is necessary to take into account variability of meteorological conditions of contaminants atmospheric transport and dispersion. This may be obtained by means of multivariant serial calculations with usage of real meteorological data from some past years. The method suggested makes it possible to increase drastically the necessary amount of calculations and therefore computation time.*

**Keywords:** radiation safety foundation, radiation situation, radioactivity release, atmospheric transport, mathematical models, numerical codes, computation time.

### Введение

Обоснование безопасности АЭС требует, в частности, оценки радиационной обстановки при выбросах радиоактивных веществ как в аварийных режимах, так и при нормальной эксплуатации. Так, для проектируемых в рамках Федеральной Целевой Программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения» АЭС с РУ на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем выдвигается требование отсутствия

необходимости эвакуации населения из окрестностей АЭС при любых аварийных выбросах. В связи с этими жесткими требованиями необходимы методы расчета атмосферного переноса и рассеивания примесей, дающие реалистичную оценку и имеющие минимальную степень консерватизма.

К таким методам относятся, например, разработанная в ИБРАЭ РАН лагранжева траекторная модель атмосферного переноса, лежащая в основе расчетных кодов НОСТРАДАМУС [1, 2] и РОМ [3]. Эта модель имеет значительно более широкую область применения по сравнению используемыми в настоящее время упрощенными гауссовыми моделями [4], но требует существенно большего объема вычислительной работы.

В настоящей работе рассматривается модификация расчетного метода кода РОМ, обеспечивающая радикальное снижение объема вычислений (и, следовательно, сокращения времени счета) при расчете радиационной обстановки от выбросов большой продолжительности.

Рассеивание в атмосфере радиоактивных выбросов в газовой и аэрозольной форме в значительной мере определяется метеорологической обстановкой – трехмерным векторным полем скорости ветра, полем коэффициентов турбулентной диффузии, интенсивностью осадков. При анализе и обосновании безопасности АЭС и других объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) («доаварийный анализ») и оценке последствий радиоактивных выбросов метеорологические условия переноса примесей заранее неизвестны. Поэтому в данном случае по необходимости должен применяться консервативный подход («наихудшие метеорологические условия», приводящие к самым неблагоприятным параметрам радиационной обстановки).

В случае, если выброс имеет малую продолжительность (меньше 3 часов), консервативным предположением является то, что направление ветра не изменяется на протяжении выброса, а остальные метеорологические условия являются наиболее неблагоприятными и также остаются неизменными.

Однако, в случае выбросов большой продолжительности (сутки и более) вероятность того, что за время выброса метеорологические условия не изменятся (и останутся наиболее неблагоприятными), практически нулевая. В этом случае использование предположения о неизменности метеорологических условий привело бы к заведомо завышенной оценке параметров радиационной обстановки. Очевидно, что реалистичная оценка может быть получена только при учете реальной изменчивости погодных условий во время выброса, характерной для места размещения данного ОИАЭ.

### **Использование реальных метеорологических данных**

Необходимая информация об этих условиях для данной местности может быть извлечена из временных рядов метеорологических данных Всемирной метеорологической организации (ВМО) за последние несколько лет. Эти данные хранятся в виде записей результатов метеорологических измерений на метеостанциях с трехчасовым интервалом (архивы ВМО), а также в виде так называемых, «реанализов», представляющих собой результаты метеорологических расчетов, проведенных по тем же программам, что используются для прогноза («прогноз задним числом») с учетом фактических стационарных данных.

Использование статистических характеристик (распределение вероятности направления ветра («роза ветров»), вероятности силы ветра, вероятности категории устойчивости атмосферы, осадков и др.) не позволяет в полной мере учесть взаимные корреляции всех этих параметров, а также корреляции между ними и переменными характеристиками источника выброса.

В последнее время в расчетной практике обоснования безопасности АЭС [5, 6, 7] стал использоваться другой метод, который является наиболее прямым и последовательным. Он не связан ни с какими предположениями и упрощениями при статистическом усреднении и автоматически учитывает все упомянутые корреляции. Метод заключается в следующем: производится серия расчетов радиационной обстановки вокруг заданного объекта с одним и тем же источником, характеристики которого, вообще говоря, зависят от времени. Серия расчетов проводится с реальными метеорологическими условиями, в качестве которых берутся данные из упоминавшихся выше записей метеоданных временных рядов ВМО за последние несколько лет. Отдельные расчеты в этой серии отличаются друг от друга только последовательным сдвигом времени начала выброса на определенный промежуток, например, на три часа (интервал записи метеопараметров в архивах ВМО). Начало выброса последовательно смещается от начала временного ряда метеоданных до его конца, так что общее количество расчетов равно количеству интервалов сдвига (3-часовых) на полной длине временного ряда (несколько лет), а длительность каждого такого расчета из серии равна длительности выброса.

Таким образом, перебираются все возможные погодные условия, имевшие место в данном регионе за длительный предшествующий срок (длина используемого временного ряда), причем с учетом временной зависимости параметров самого выброса. Использование метеорологических данных за последние несколько лет позволяет учесть сезонный ход метеопараметров, а сдвиг между последовательными расчетами на 3 часа дает возможность учесть суточный ход.

В каждом расчете из серии вычисляются значения доз облучения на момент окончания выброса в каждом узле расчетной сетки и/или в каждой заранее выбранной точке. Общее количество этих значений в каждой точке при сдвиге начала «3 часа» и общей длительности временного ряда «1 год» равно количеству 3-часовых интервалов в году, т.е. 2920. Эта совокупность расчетных данных позволяет оценить распределение дозы в каждой точке и статистические характеристики. Тем самым получается реалистичная оценка радиационной обстановки, включающую и оценку неопределенности результата.

### **Алгоритм сокращения объема вычислений за счет исключения повторных расчетов атмосферного переноса**

Однако, этот метод, если его применять непосредственно (как это делается, например, в [5, 7]), требует слишком большого количества вычислений. Так, при продолжительности выброса 30 суток и длине временного ряда 1 год потребуются произвести расчет  $30 \cdot 24/3 = 240$  3-часовых интервалов атмосферного переноса  $365 \cdot 24/3 = 2920$  раз. Количество расчетов можно радикально сократить, если исключить повторные расчеты атмосферного переноса.

В настоящей работе предлагается способ радикального сокращения количества таких расчетов, и, следовательно, общего времени счета.

Рассмотрим некоторый отдельный расчет, в котором время прогнозирования (равное длительности выброса)  $t_s$  состоит из  $N$  трехчасовых интервалов (при длительности выброса 30 суток  $N=240$ ). Доза облучения на конец выброса суммируется из доз, накопленных на 1-м, 2-м, 3-м, ...,  $N$ -м интервалах. Теперь рассмотрим расчет той же дозы со сдвинутым на один 3-часовой интервал началом выброса. Эта доза будет складываться из доз, полученных на 2-м, 3-м, ...,  $N$ -м,  $(N+1)$ -м интервалах. По сравнению с предыдущим расчетом к суммарной дозе на время окончания выброса добавляется доза от  $(N+1)$ -го интервала и вычитается доза от 1-го. На интервалах от 2-го до  $N$ -го метеорологические условия в обоих расчетах общие.

При этом источники, действующие в обоих расчетах на общих (по метеоусловиям) интервалах, будут разными: так, в расчете со сдвинутым началом на 1-м интервале будет иметь место источник, который в исходном расчете был на 2-м интервале и т.д.

Это дает возможность не повторять расчеты собственно атмосферного переноса с одинаковыми погодными условиями, а использовать уже рассчитанные параметры радиационной обстановки и пересчитывать по ним эти параметры от другого источника. Поскольку расчет атмосферного переноса практически целиком определяет полное время счета, это время может быть резко сокращено за счет применения описанной методики. Так, при продолжительности выброса 30 суток, т.е., 240 3-часовых интервалов, выигрыш по объему вычислений и времени счета составит 240 раз.

### Алгоритм пересчета доз облучения при исключении повторных расчетов атмосферного переноса

Для того, чтобы можно было пересчитать дозы облучения при тех же метеорологических условиях, но от другого источника, предлагается, прежде всего, разбить источник радионуклидов на несколько групп по свойствам осаждения на поверхность. В каждой такой группе должны быть одинаковые все для входящих в нее радионуклидов свойства: скорость сухого осаждения, скорость гравитационного оседания и скорость вымывания осадками. В этом случае метеорологические факторы – фактор разбавления и фактор обеднения облака будут одинаковы для всех радионуклидов группы.

К отдельным группам можно отнести, например, радиоактивные благородные газы (РБГ), имеющие нулевую скорость осаждения и вымывания осадками, аэрозольные частицы с конечной скоростью осаждения, изотопы йода в разных физико-химических формах, имеющие каждая свои скорости осаждения. Дозы облучения должны вычисляться для каждой группы отдельно и складываться.

Рассмотрим сначала расчет дозы внешнего облучения от облака. Вклад в эту дозу, накопленный за данный  $m$ -й 3-часовой интервал  $t_m < t < t_m + \Delta t$  ( $t_m$  – его начало,  $\Delta t = 3$  час) от радионуклида  $r$  в некоторой точке  $i$ , представляется как

$$D_{r,i,m}^{obl} = R_r^{obl} \int_{t_a}^{t_d} c_{r,i,m}(t) dt = R_r^{obl} \int_{t_a}^{t_d} c'_{r,i,m}(t) \exp(-t / \tau_r) dt = R_r^{obl} \lambda_{r,i,m} \int_{t_a}^{t_d} c'_{r,i,m}(t) dt .$$

где  $D_{r,i,m}^{obl}$  – доза облучения от облака от нуклида  $r$  в  $i$ -й точке расчетной области (в  $i$ -м узле расчетной сетки), накопленная за  $m$ -й временной интервал;  $c_{r,i,m}(t)$  – концентрация  $r$ -го радионуклида около поверхности в  $i$ -й точке на  $m$ -м временном интервале как функция времени (Бк/м<sup>3</sup>);  $c'_{r,i,m}(t)$  – концентрация этого нуклида без учета радиоактивного распада (Бк/м<sup>3</sup>);  $t_a$  и  $t_d$  – время прихода и ухода облака от  $i$ -й точки (с);  $R_r^{obl}$  – соответствующий коэффициент дозового преобразования нуклида  $r$  для облучения от облака (Зв м<sup>3</sup>/Бк с);  $\tau_r$  – характерное время распада нуклида  $r$ (с);  $\lambda_{r,i,m}$  – множитель, учитывающий влияние радиоактивного распада радионуклида  $r$  на дозу в точке  $i$ :

$$\lambda_{r,i,m} = \frac{\int_{t_a}^{t_d} c'_{r,i,m}(t) \exp(-t / \tau_r) dt}{\int_{t_a}^{t_d} c'_{r,i,m}(t) dt} = \frac{\int_{t_a}^{t_d} c'_{r,i,m}(t) \exp(-t / \tau_r) dt}{TIC_{r,i,m}} \quad (1)$$

(TIC – интегралконцентрации (timeintegratedconcentration)). Эта величина выражается через метеорологические характеристики [4]:

$$TIC_{r,i,m} = A_{r,m} \psi_{i,m} \varphi_{i,m},$$

где  $A_{r,m}$  – полная активность радионуклида  $r$ , выброшенная из источника на  $m$ -м временном интервале (Бк);  $\psi_{i,m}$  – метеорологический фактор разбавления для метеоусловий на  $m$ -м временном интервале ( $\text{с/м}^3$ )  $i$ -й точке расчетной сетки;  $\varphi_{r,i,m}$  – фактор обеднения облака в той же точке для тех же метеоусловий.

Таким образом,

$$D_{r,i,m}^{obl} = A_{r,m} \psi_{i,m} \varphi_{i,m} R_r^{obl} \lambda_{r,i,m}, \quad (2)$$

а полная доза облучения от облака от источника, соответствующего  $m$ -му интервалу с полным выбросом нуклидов  $A_{r,m}$ , получается суммированием (2) по нуклидам:

$$D_{i,m}^{obl} = \psi_{i,m} \varphi_{i,m} \sum_r A_{r,m} R_r^{obl} \lambda_{r,i,m} \quad (3)$$

Метеорологические параметры  $\psi_{im}$  и  $\varphi_{im}$ , как отмечалось выше, одинаковы для всех нуклидов, входящих в группу, поэтому вынесены за знак суммирования.

Доза  $D_{r,i,n}^{obl}$  от источника, соответствующего  $n$ -му интервалу с выбросом  $A_{r,n}$ , но с теми же метеорологическими условиями, может быть рассчитана так же, как (3). При этом метеорологические факторы  $\psi_{im}$  и  $\varphi_{im}$  и множитель  $\lambda_{r,i,m}$  остаются теми же, а  $A_{r,m}$  заменяется на  $A_{r,n}$ . Поэтому, если  $D_{r,i,m}^{obl}$  вычислена, то  $D_{r,i,n}^{obl}$  может быть пересчитана следующим образом:

$$D_{i,n}^{obl} = D_{i,m}^{obl} K_{n,m}^{obl}, \quad K_{n,m}^{obl} = \frac{\sum_r R_r^{obl} A_{r,n} \lambda_{r,i,m}}{\sum_r R_r^{obl} A_{r,m} \lambda_{r,i,m}}. \quad (4)$$

Точно так же пересчитывается ожидаемая доза внутреннего облучения от ингаляции, связанная с вдыханием радионуклидов [4] в течение данного 3-часового интервала:

$$D_{i,n}^{unz} = D_{i,m}^{unz} K_{n,m}^{unz}, \quad K_{n,m}^{unz} = \frac{\sum_r R_r^{unz} A_{r,n} \lambda_{r,i,m}}{\sum_r R_r^{unz} A_{r,m} \lambda_{r,i,m}}, \quad (5)$$

где  $R_r^{unz}$  – коэффициент дозового преобразования для внутреннего облучения от ингаляции от радионуклида  $r$ .

Плотность выпадений  $S_{r,i,m}$  (Бк/с) радионуклида  $r$ , в точке  $i$  на  $m$ -м 3-часовом интервале определяется следующим соотношением:

$$\frac{d S_{r,i,m}}{dt} = c_{r,i,m}(t) (V_d + h_{i,m} P_{i,m} \chi) - \frac{S_{r,i,m}}{\tau_r}, \quad (6)$$

где  $V_d$  – скорость сухого осаждения аэрозольных частиц (м/с);  $h_{i,m} = \frac{1}{c_{r,i,m}(t)} \int_0^\infty C_{r,i,m}(t,z) dz$  – характерный вертикальный размер облака в точке  $i$  (м);  $C_{r,i,m}(t,z)$  – вертикальный профиль концентрации над точкой  $i$  ( $C_{r,i,m}(t,0) = c_{r,i,m}(t)$ ;  $h_{i,m}$  не зависит от  $r$ , т.к. пространственные профили концентрации всех нуклидов одной группы подобны и отличаются друг от друга постоянным множителем);  $P_{i,m}$  – интенсивность осадков в точке  $i$  (мм/час);  $\chi$  – коэффициент вымывания аэрозолей осадками (час/с мм).

Если в (6)  $c_{r,i,m}(t) = const$  и  $h_{i,m}(t) = const$  (не зависят от времени при  $t_a < t < t_d$ ), то поверхностная плотность выпадений радионуклида  $r$  в точке  $i$  равна

$$S_{r,i,m} = c_{r,i,m} (V_d + h_{i,m} P_{i,m} \chi) \tau_r (1 - \exp(-t / \tau_r)) \quad (7)$$

( $t$  отсчитывается от  $t_a$ ). В общем случае плотность выпадений, накопленная на  $m$ -м временном интервале, может быть выражена через параметры источника и метеорологии следующим образом:

$$S_{r,i,m} = A_{r,m} \psi_{i,m} \varphi_{i,m} (V_d + \bar{h}_{i,m} P_{i,m} \chi) \lambda'_{r,i,m}, \quad (8)$$

$\bar{h}_{i,m}$  – среднее по времени на интервале  $t_a-t_d$  значение величины  $h_{i,m}$ ;  $\lambda'_{r,i,m}$  – коэффициент, учитывающий влияние радиоактивного распада на плотность выпадений.

Доза внешнего облучения от поверхности, накопленная за  $m$ -й 3-часовой интервал от радионуклида  $r$  в точке  $i$ , может быть представлена выражением:

$$D_{r,i,m}^{nos} = \int_{t_a}^{t_d} S_{r,i,m}(t) R_r^{nos} dt = R_r^{nos} A_{r,m} \psi_{i,m} \varphi_{i,m} (V_d + \bar{h}_{i,m} P_{i,m} \chi) \lambda''_{r,i,m} \delta t, \quad (9)$$

где  $R_r^{nos}$  – коэффициент дозового преобразования нуклида  $r$  для облучения от поверхности;  $\lambda''_{r,i,m}$  – коэффициент, учитывающий распад и зависимость объемной концентрации активности от времени,  $\delta t = t_d - t_a$ .

Поскольку параметры  $\psi_{i,m}, \varphi_{i,m}, V_d, \bar{h}_{i,m}, P_{i,m}, \lambda''_{r,i,m}$  в (9) одинаковы для всех нуклидов одной группы при одних и тех же метеорологических условиях, пересчет дозы от поверхности производится по формуле:

$$D_{r,i,n}^{nos} = D_{r,i,m}^{nos} K_{n,m}^{nos}, \quad K_{n,m}^{nos} = \frac{\sum_r R_r^{nos} A_{r,n} \lambda''_{r,i,m}}{\sum_r R_r^{nos} A_{r,m} \lambda''_{r,i,m}}. \quad (10)$$

Если в составе выброса все радионуклиды имеют характерное время распада, много большее 3-часового временного интервала, то все  $\lambda_{r,i,m} \approx \lambda'_{r,i,m} \approx \lambda''_{r,i,m} \approx 1$ , и формулы (4), (5) и (10) дают решение задачи. Эти выражения являются точными в том смысле, что результаты расчета дозы путем прямого интегрирования мощности дозы по модели кода РОМ и расчета по формулам (4), (5), (10) совпадут.

При наличии в составе выброса нуклидов с  $\tau_r < 3$  часов коэффициенты  $\lambda_{r,i,m}, \lambda'_{r,i,m}, \lambda''_{r,i,m} < 1$ , и расчет по формулам (4), (5), (10) с единичными значениями этих коэффициентов даст консервативную оценку доз облучения. Эту оценку можно уточнить, вычислив эти коэффициенты приближенно.

Для оценки коэффициентов  $\lambda_{r,i}, \lambda'_{r,i}$  и  $\lambda''_{r,i}$  учитываем, что на данном 3-часовом интервале интенсивность источника постоянна и исходим из двух предположений: временной профиль объемной концентрации активности в данной точке представляет прямоугольную «ступеньку» длительностью  $\delta t$  с резкими передним и задним фронтами и постоянным значением концентрации между ними; скорость ветра (и скорость распространения примеси) постоянна (не зависит от высоты).

В этих предположениях множитель  $\lambda_{r,i,m}$  в (4), (5) может быть приближенно оценен как  $\lambda_{r,i} \approx \exp(-\frac{t_i}{\tau_r})$ , где  $t_i$  - промежуток времени от выхода облака из источника до подхода к точке  $i$ . Это время порядка  $t_i \approx R_i / V$ , где  $V$  – скорость ветра на высоте источника, а  $R_i$  – расстояние от точки  $i$  до источника.

Величина  $\lambda'_{r,i}$  в (8) в тех же предположениях с учетом (7) может быть оценена как  $\lambda'_{r,i} \approx \frac{\tau_r}{\delta t} \left( 1 - \exp(-\frac{\delta t}{\tau_r}) \right) \exp(-\frac{t_i}{\tau_r})$  (здесь учтено, что в течение интервала  $\delta t$  метеословия и концентрации постоянны).

Входящий в формулу (10) пересчета дозы от поверхности множитель  $\lambda''_{r,i}$  может быть приближенно представлен как  $\lambda''_{r,i} \approx \tau_r \left( \delta t + (\exp(-\frac{\delta t}{\tau_r}) - 1)\tau_r \right) \exp(-\frac{t_i}{\tau_r})$ .

Фактически ни одно из предположений, используемых для оценки коэффициентов  $\lambda_{r,i}, \lambda'_{r,i}, \lambda''_{r,i}$ , не выполняется. Это связано с наличием турбулентной диффузии в направлении распространения и зависимости скорости ветра от высоты. Эти факторы приводят к расширению переднего и заднего фронтов временного профиля концентрации в данной точке и к разным скоростям частей облака, находящихся на разных высотах. Поэтому полученные выше значения коэффициентов для учета радиоактивного распада могут дать оценку дозы облучения лишь с определенной погрешностью. Эта погрешность, зависит, очевидно, от времени распада радионуклида. Она может быть определена путем сравнения значений доз, рассчитанных с помощью кода РОМ обычным способом прямого интегрирования мощности дозы и по формулам (4), (5), (10).

В табл. 1 представлены результаты такого сравнения по дозе внешнего облучения от облака для нескольких радионуклидов с разными характерными временами распада. Для сравнения рассчитывалась доза, создаваемая на расстоянии 20 км от источника, действующего непрерывно в течение 3 часов и выбрасывающего один из нуклидов.

В расчете были приняты следующие характеристики: полная активность, выброшенная источником,  $A_r = 10^{16}$  Бк для каждого нуклида; время действия источника – 3 часа; скорость ветра принята равной 1 м/с; класс устойчивости – D (нейтральная стратификация); высота источника 50 м; шероховатость местности 0,1 м.

Базовой дозой ( $D_{i,m}^{обл}$ ) при расчете дозы по формуле (4) выбиралась доза от Cs-134, распадом которой на интервале времени порядка 3 часов можно пренебречь.

Сравнение расчетных доз внешнего облучения от облака, вычисленных разными способами:  $D_D$ - доза, рассчитанная прямым интегрированием мощности дозы кодом РОМ;  $D_F$  - доза, рассчитанная по формуле (4)

Нуклид	$T_{1/2}$ , час	ТЭС, Бк с/м <sup>3</sup>	$D_D$ , Зв	$D_F$ , Зв	Отклонение, %
Cs-134	$1.806 \cdot 10^4$	$1.75 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	0
I-135	6.61	$1.75 \cdot 10^9$	$9.710 \cdot 10^{-5}$	$9.1 \cdot 10^{-5}$	6
I-132	2.29	$1.75 \cdot 10^9$	$6.1 \cdot 10^{-5}$	$6.7 \cdot 10^{-5}$	10
I-134	0.876	$1.75 \cdot 10^9$	$1.32 \cdot 10^{-5}$	$1.77 \cdot 10^{-5}$	30

Как видно из таблицы, погрешность формулы (4) максимальна для самого короткоживущего из выбранных нуклидов - I-134. Для выбранных метеоусловий переноса она составляет 30%, что много меньше неопределенности самой лагранжевой траекторной модели атмосферного переноса [1,2]. Таким образом, погрешность, связанная с приближенным расчетом доз в данном случае практически не сказывается на общей неопределенности результата расчета.

### Заключение

Реалистичная оценка радиационной обстановки при продолжительных выбросах радиоактивных веществ на АЭС или других ОИАЭ может быть получена путем проведения многовариантных расчетов с реальными погодными данными и последовательным сдвигом начала выброса. Прямое проведение подобных расчетов потребовало бы неприемлемо большого времени при работе на персональном компьютере.

В настоящей работе предложен алгоритм таких расчетов, обеспечивающий радикальное сокращение объема вычислений и времени счета.

Алгоритм основан на том, что в расчетах со сдвигом момента начала выброса исключаются повторные расчеты собственно атмосферного переноса на основе лагранжевой траекторной модели в одних и тех же погодных условиях. Параметры радиационной обстановки при этом пересчитываются в соответствии с изменением характеристик источника.

Это сокращает объем вычислительной работы и, соответственно, времени счета задачи на один-два порядка величины (в зависимости от продолжительности выброса) по сравнению с прямым «лобовым» многовариантным расчетом с последовательным сдвигом начала выброса. При продолжительности выброса 30 суток выигрыш во времени счета составляет 240 раз. Это дает возможность оперативных оценок последствий продолжительных выбросов на АЭС с использованием персонального компьютера.

### Литература

1 Арутюнян Р.В., Беликов В.В., Беликова Г.В., Головизнин В.М., Семенов В.Н., Сороковикова О.С., Стародубцева Л.П., Фокин А.Л. Новые эффективные численные методики моделирования процесса распространения радионуклидов в атмосфере и их практическое использование. Известия Академии Наук. Сер. Энергетика. - 1995, № 4, с. 31 - 44.

2 Арутюнян Р.В., Беликов В.В., Беликова Г.В., Головизнин В.М., Киселев В.П., Семенов В.Н., Сороковикова О.С., Стародубцева Л.П., Фокин А.Л. Компьютерная система "НОСТРАДАМУС" для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно-опасных объектах. Известия Академии Наук. Сер. Энергетика. - 1995, N4, с. 19 - 30.



3 Сороковикова О.С., Семенов В.Н., Дзама Д.В., Благодатских Д.В. Расчетный код РОМ для оценки радиационной обстановки в региональном масштабе при радиоактивных выбросах в атмосферу. Международная конференция по быстрым реакторам FR17, Екатеринбург. - 2017, IAEA-CN245-377.

4 Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. Нормативно-технический документ стран-членов СЭВ и СФРЮ 38.220.56-84. М., Энергоиздат. - 1984, т.1, ч.1, 52 с.

5 Masanori Kimura, Shogo Takahara and, Toshimitsu Homma. Evaluation of the precautionary action zone using a probabilistic consequence analysis. Journal of Nuclear Science and Technology. - 2013 Vol. 50, No. 3, 296–303. <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2013.772725>.

6 Tero Tyrväinen, Ilkka Karanta, Jukka Rossi. FINNISH EXPERIMENTS ON LEVEL 3 PRA. 13th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 13) 2-7 October, 2016, Sheraton Grande Walkerhill, Seoul, Korea.

7 ConsortiumPöyry – LEI.EIA Report. RISK ANALYSIS AND ASSESSMENT. 27 August 2008. [http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/umweltpolitische/ESPOOverfahren/UVP\\_KKW\\_Litauen/UVEKKWLITdt/UVEKKWLIT\\_EN-Kap10.pdf](http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/umweltpolitische/ESPOOverfahren/UVP_KKW_Litauen/UVEKKWLITdt/UVEKKWLIT_EN-Kap10.pdf)

### Сведения об авторах

**Дзама Дмитрий Владимирович** – м.н.с. ИБРАЭ РАН, РФ, 115191, Большая Тульская, 52, тел. 8(495)955-22-59, 8(901)711-06-00, email: [diman\\_sw@mail.ru](mailto:diman_sw@mail.ru)

**Семенов Владимир Николаевич** – зам. зав. отделением ИБРАЭ РАН, РФ, 115191, Большая Тульская, 52, тел. 8(495)955-22-59, 8(903)766-32-15, email: [sem@ibrae.ac.ru](mailto:sem@ibrae.ac.ru)

**Сороковикова Ольга Спартаковна** – зав. лаб. ИБРАЭ РАН, РФ, 115191, Большая Тульская, 52, тел. 8(495)955-22-59, 8(977)273-12-98, email: [olga\\_sorokov@mail.ru](mailto:olga_sorokov@mail.ru)

**Фокин Алексей Леонидович** – с.н.с. ИБРАЭ РАН, РФ, 115191, Большая Тульская, 52, тел. 8(495)955-22-59, 8(916)072-41-81, email: [fokin@ibrae.ac.ru](mailto:fokin@ibrae.ac.ru)